

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Diplomová práce

2014

Bc. Denisa Lyduchová

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Optimalizace balíkového doručování v obvodu depa České pošty Opava

Optimization of parcel delivering for Czech post depot in Opava

Student:

Bc. Denisa Lyduchová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Denisa Lyduchová**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie  
Specializace: 30 Technologie dopravy  
Téma: **Optimalizace balíkového doručování v obvodu depa České pošty Opava**  
**Optimization of Parcel Delivering for Czech Post Depot in Opava**

Zásady pro vypracování:

Úvod

Charakteristika problémů spojených s přepravou zásilek v obvodu zvoleného depa

Teoretická východiska řešení a volba vhodné metody řešení

Výpočetní experimenty v reálných podmínkách

Zhodnocení dosažených výsledků použitých metod

Formulace doporučení z hlediska implementace vhodných metod do praxe

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Janáček, J.: Optimalizace na dopravních sítích. Žilina: ŽU v Žilině. 2003. ISBN 80-8070-031-1

Janáček, J. a kol.: Navrhovanie územne rozľahlých obslužných systémov. Žilina: ŽU v Žilině. 2010. ISBN 978-80-554-0219-2

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

.....  
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Denisa Lyduchová

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hraniční 593  
Šenov, 739 34

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady a trpělivost při konzultacích diplomové práce.

Dále bych také ráda poděkovala paní Ing. Haně Lichovnickové, Ph. D. a paní Štěpánce Žabíčkové z České pošty, za poskytnutí podkladů, které byly potřebné, při tvorbě diplomové práce.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LYDUCHOVÁ, D. Optimalizace balíkového doručování obvodu depa České pošty Opava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2014, 48 s. Vedoucí práce: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Diplomová práce se věnuje optimalizaci doručování balíkových zásilek, konkrétně prověřením možných úspor v ujeté vzdálenosti při svozu a rozvozu balíkových zásilek v obvodu vybraného depa České pošty. V úvodní části diplomové práce je popsán řešený problém a je stanoven cíl diplomové práce. V hlavní části diplomové práce popsány vhodné metody pro řešení daného problému a na základě parametrů řešeného problému je vybrána vhodná metoda k řešení. K řešení úlohy byl použit lineární matematický model, který je v odborné literatuře určen k řešení úlohy obchodního cestujícího s časovými okny. V další části diplomové práce je provedena optimalizace daného problému vybranou optimalizační metodou. Dále jsou testovány možnosti dosažení úspory vlivem změn délek časových oken určených k obsluze. V závěru diplomové práce jsou zhodnoceny výsledky získané na základě optimalizace.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

LYDUCHOVÁ, D. Optimization of parcel delivering for Czech post depot in Opava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of mechanical engineering, Institute of transport, 2014, 48 p. Thesis head: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

This master thesis deals with optimization of parcel delivering, to be exact it deals with verification of possible savings of driven distance during delivering and collecting of parcel at Czech post depot. The introduction describes solved problem and defines the goal of this thesis. The main section describes proper methods that can be used in this exact issue and on the basis of solved problem's parameters, it defines the proper method that was used in this thesis. As the proper method was chosen linear mathematical model, which is meant to be used for problems of vehicle routing problem with time windows. Next section consists of optimization of the issue by chosen method. To verify if there is any possibilities of saving driven distance there are made changes of customer service by changing the time windows of the service. At the end of this thesis there are results obtained by optimization.

## Obsah

0. Úvod.....	1
1. Charakteristika problémů spojených s přepravou zásilek v obvodu zvoleného depa.....	3
2. Teoretická východiska řešení a volba vhodné metody řešení.....	5
2.1. Exaktní metody.....	5
2.1.1. Floydův algoritmus.....	5
2.1.2. Littlův algoritmus.....	6
2.1.3. Matematický model nahrazující Littlův algoritmus.....	7
2.1.4. Matematický model nahrazující Littlův algoritmus s časovými okny a větším počtem obslužných vozidel.....	8
2.2. Heuristické metody.....	10
2.2.1. Metoda nejbližšího dosud nenavštíveného vrcholu.....	10
2.2.2. Clark Wrightova metoda.....	11
2.2.3. Genetické algoritmy.....	11
2.2.4. Umělé neuronové sítě.....	12
2.2.5. Optimalizace pomocí algoritmů pracujících na bázi mravenčích kolonií.....	13
2.3. Zdůvodnění výběru vhodné metody pro řešení.....	13
2.4. Optimalizační software Xpress – IVE.....	14
2.4.1. Transformace matematického modelu do jazyku MOSEL.....	15
3. Výpočetní experimenty v reálných podmínkách.....	18
3.1. Výpočetní experiment – doručovací okresek 1.....	19
3.2. Výpočetní experiment – doručovací okresek 2.....	27
3.3. Výpočetní experiment – doručovací okresek 3.....	29
3.4. Výpočetní experiment – doručovací okresek 4.....	33
3.5. Výsledné hodnoty optimalizace.....	36
3.6. Optimalizace časových mezí obsluhy.....	37
3.7. Optimalizace slučování doručovacích okreseků.....	39
4. Zhodnocení výsledků optimalizace.....	41
5. Formulace doporučení z hlediska implementace vhodných metod do praxe.....	42
6. Závěr.....	43
7. Použitá literatura.....	44

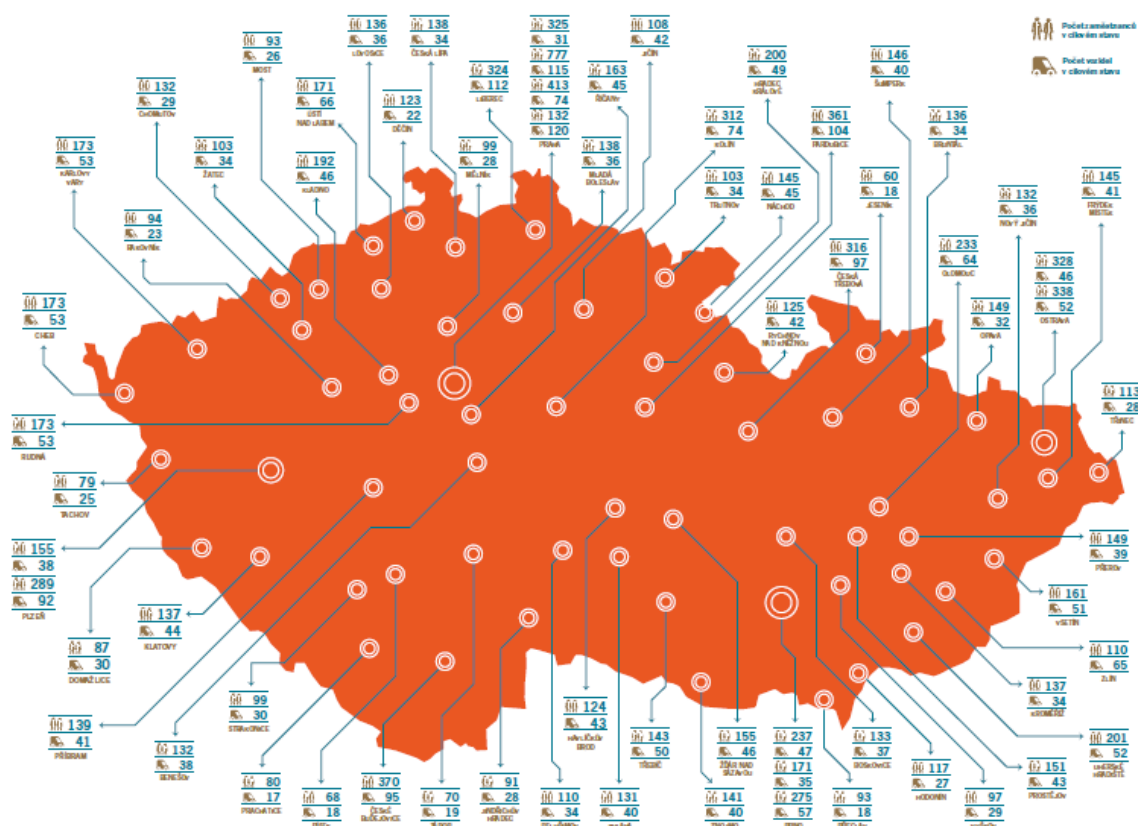


## 0. Úvod

Česká pošta je jediným státním podnikem na území České republiky sloužícím nejen k doručování balíkových a listovních zásilek, ale i mnoha dalších služeb, jako jsou například poskytování reklamních a tiskových služeb, prodejních služeb různého typu (např. e-shop). Je to zároveň největší podnik, co se týče otázky počtu zaměstnanců, kterých Česká pošta zaměstnává v průměru 32 163 (vztaženo k roku 2012). Co se týče doručování balíkových zásilek, však Česká pošta není jediným poskytovatelem této služby na českém trhu. Na trhu existuje celá řada soukromých firem, které se snaží České poště konkurovat (např. UPS).

Charakteristickým rysem dnešní doby na trhu doručování balíkových zásilek je tak vysoká konkurence. Z tohoto důvodu je nutné zabývat se neustále problematikou zvyšování kvality celého doručovacího procesu, protože jedině tak je možno udržet konkurenceschopnost nabízené služby. Zvyšování kvality neznamena pouze zvyšování flexibility v doručování, ale také snižování nákladů na doručovací proces.

Za účelem racionalizace nákladů doručovacího procesu zřizuje Česká pošta v posledních letech tzv. depa. Jedná se o centralizované jednotky logistické sítě České pošty v rámci ČR, jejichž lokalizaci z roku 2013 je možno vidět na obr. č. 0.1. [12]



Obr. č. 0.1: Lokalizace depa České pošty na území ČR [12]

Na obrázku č. 0.1 jsou kromě lokalizace dep uvedeny i další základní informace o jednotlivých depech, kterými jsou počet zaměstnanců a počet vozidel obsluhujících atrakční obvody jednotlivých dep. Depa České pošty jsou zřizována z důvodů nedostačujících ploch pro zpracování balíkových zásilek, nevhodných dispozičních a manipulačních řešení stávajících poboček České pošty, odkud v minulosti docházelo ke třídění a rozvážení balíkových zásilek.

Hlavním úkolem zřizovaných dep je zajišťovat svoz a rozvoz zásilek v rámci přiděleného atrakčního obvodu, provádět třídění zásilek podle jednotlivých směrů, provádět hromadný podej předem smluvených firem a v odůvodněných případech i provozování pobočky České pošty pro zákazníky.

Cílem této diplomové práce je prověřit optimalitu procesu svozu a rozvozu balíkových zásilek pro konkrétní část obvodu vybraného depa. Tímto vybraným depem bude neveřejné depo č. 70 v Opavě – Komárově. Výsledky diplomové práce mohou posloužit jako návrh určitých opatření směřujících k racionalizaci jeho provozu.

## 1. Charakteristika problémů spojených s přepravou zásilek v obvodu zvoleného depa

Provoz depa Opava - Komárov byl zahájen 1. 9. 2012. V současné době depo zaměstnává 163 pracovníků a pro obsluhu atrakčního obvodu má k dispozici 33 vozidel. Fotodokumentace depa Opava – Komárov je uvedena na obr. č. 1.1.



Obr. č. 1.1: Depo Opava 70 [13]

Atrakční obvod je rozdělen na několik dílčích částí, tzv. doručovacích okrsků. V předložené diplomové práci nebude pozornost věnována atrakčnímu obvodu jako celku, nýbrž pouze jeho vybrané části charakterizované určitým počtem doručovacích okrsků, konkrétně okrsků 1 - 4. Do doručovacích okrsků, které budou předmětem řešení, spadají zákazníci systému doručování balíkových zásilek a pobočky České pošty v obcích Kravaře, Velké Hoštice, Chlebičov, Oldřišov, Hněvošice, Štěpánkovice, Kobeřice, Rohov, Strahovice, Chuchelná a Bolatice.

Zákazníci nacházející se ve vyjmenovaných obcích definují požadavky na přepravu balíkových zásilek, pobočky České pošty požadují přepravu bezpečnostních kontejnerů mezi nimi a depem Opava – Komárov.

K obsluze uvedené části opavského atrakčního obvodu jsou vyčleněna 4 vozidla dodávkového typu – dvě vozidla Ford Transit, jedno vozidlo Peugeot Boxer a jedno vozidlo Fiat Doblo, viz obr. č. 1.2.



Obr. č. 1.2: Ilustrační foto Ford Transit

Řešený problém při doručování nastává při obsluze doručovacích okrsků, kdy depo obsluhuje dané poštovní pobočky. Vozidlo se po obsluze musí vrátit zpět do depa, kde mají být odevzdány bezpečnostní boxy z poštovních poboček. Následně se vozidlo vrátí zpět k obsluze doručovacího okrsku. Tento úkon však není vždy z časového hlediska zvládnán. Protože pořízení dalšího vozidla k obsluze uvedených doručovacích okrsků znamená nárůst nákladů a v nevhodné situaci také snížení využití vozidlového parku, je před rozhodnutím o případném nákupu žádoucí prověřit, zda není možno daný problém vyřešit jinak, než pořízením vozidla navíc, konkrétně přeorganizováním činností spojených s obsluhou doručovacích okrsků.

Problém obsluhy zákazníků a poboček České pošty na území vybrané části atrakčního obvodu depa Opava – Komárov se dá formulovat jako klasický optimalizační problém obsluhy vrcholů v dopravní síti. K řešení daného problému je možno použít celou řadu metod, jejichž vhodnost vyplývá z konkrétní situace. Zatím účelem budou v následující kapitole popsány některé běžně používané metody, které mohou mít pro řešení problému vhodný aplikační potenciál.

Modely řešící obsluhu zákazníků v jednotlivých doručovacích okrscích se budou lišit svou velikostí, která plyne z obsluhovaných zákazníků. V modelu s minimálním počtem obsluhovaných zákazníků se vyskytují 2 zákazníci, v modelu s maximálním počtem obsluhovaných zákazníků se vyskytuje 5 zákazníků.

## 2. Teoretická východiska řešení a volba vhodné metody řešení

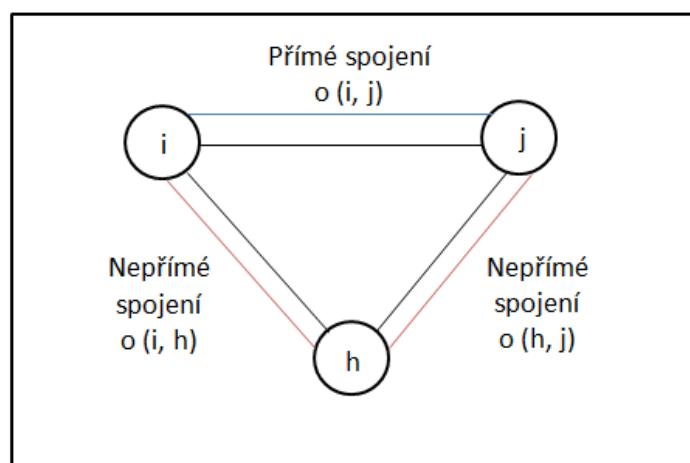
V rámci optimalizace jakéhokoli problému je nutno zvolit správnou metodu výpočtu, ta se volí vždy v závislosti na vstupních hodnotách, které jsou k dispozici a na základě efektu, kterého má být optimalizačním výpočtem dosaženo.

K optimalizaci doručování je možno využít více metod výpočtu. Jejich základní rozdělení je na exaktní, či heuristické a vybrané z nich budou popsány v následujících podkapitolách. Základní rozdíl mezi exaktními a heuristickými metodami spočívá v tom, že zatímco exaktní metody zaručují nalezení optimálního řešení, u heuristických metod tato garance zpravidla není zajištěna. Heuristické metody totiž v sobě nemají zabudován test optimality, což je základní předpoklad ověření, zda je dané testované řešení optimální, či nikoli. Z tohoto úhlu pohledu je vždy vhodnější volit exaktní metodu. Avšak i exaktní metody mají svá úskalí. V první řadě jsou exaktní metody výpočetně algoritmicky složitější a výpočetně náročnější. Z tohoto důvodu se řešitelé zpravidla uchylují k použití optimalizačních software. V takovém případě je však zapotřebí znát příslušný programovací jazyk, prostřednictvím kterého jsou do textu programu zadávány řešitelovy příkazy. Dalšími omezeními exaktních metod může být čas potřebný k řešení daného problému nebo nedostatečná výkonnost výpočetní techniky. Velice důležitým omezením je, že fakt, že optimalizační metoda pro daný typ řešeného problému nemusí existovat.

### 2.1. *Exaktní metody*

#### 2.1.1. *Floydův algoritmus*

Floydův algoritmus je jednou ze základních metod používaných k optimalizaci tras. Algoritmus slouží k vyhledání vzdálenosti resp. délky minimální cesty mezi vrcholy v dané síti. Algoritmus je pro výpočet vzdáleností mezi vrcholy dopravní sítě možno použít jak v orientovaných, tak i neorientovaných grafech. Algoritmus v průběhu výpočtu porovnává délky přímých nebo dosud nejkratších nalezených cest s jinými cestami vedoucími přes další vrcholy, viz obr. č. 2.1.



Obr. č. 2.1: Porovnání přímého/nepřímého spojení

Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [6]. Závěrem podkapitoly věnované Floydovu algoritmu je třeba uvést, že Floydův algoritmus není jediným algoritmem umožňujícím vypočítat vzdálenosti mezi vrcholy v dopravní síti. Algoritmů pro výpočet vzdáleností existuje celé spektrum. Jejich přehled je možno najít např. v publikaci [7].

### 2.1.2. *Littlův algoritmus*

Littlův algoritmus slouží k nalezení minimální Hamiltonovy kružnice reprezentující okružní jízdu s minimální délkou. Vyhledání minimální Hamiltonovy kružnice tedy umožňuje vyřešit problém okružní jízdy z daného obslužného střediska. Vozidlo, které provádí okružní jízdu, v rámci této okružní jízdy obsluhuje vrcholy – zákazníky v zadané dopravní síti, kteří mají určité požadavky na obsluhu. Po obsluze těchto vrcholů se vozidlo vrací zpět do obslužného střediska. K výpočtu je potřeba znát matici vzdáleností vypočtenou např. dle výše uvedeného Floydova algoritmu.

Úkolem Littlova algoritmu je naplánovat návštěvu všech obsluhovaných vrcholů – při tom obsloužit požadavky zákazníků a po návštěvě posledního obsluhovaného zákazníka naplánovat návrat do střediska, ve kterém byla jízda zahájena. Zároveň je požadováno, aby součet všech ujetých vzdáleností vozidel byl minimální. Algoritmus je založen na principu větví a hranic, který dělí množinu přípustných řešení na perspektivní a neperspektivní podmnožiny z pohledu nalezení optimálního řešení. Postup řešení je znázorňován pomocí speciálního typu grafu zvaného strom. Každá do konce vyvětvená větev grafu reprezentuje jedno přípustné řešení. Vrcholy v grafu jsou v průběhu výpočtu ohodnocovány, daná ohodnocení reprezentují vývoj hodnoty účelové funkce v průběhu řešení. Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [8].

### 2.1.3. Matematický model nahrazující Littlův algoritmus

Hamiltonovou kružnici je možno také vyhledat s pomocí lineárního matematického modelu.

Problematika matematického modelu bude zformulována následovně. Je dána síť, ve které vrcholy reprezentují jednotlivé zákazníky, kteří vyžadují obsluhu, těchto zákazníků bude  $n$ . Dále je známa poloha vrcholu 0, ze kterého bude prováděna obsluha vrcholů reprezentujících zákazníky a předpokládá se, že kapacita vrcholu 0 je vyšší, než součet všech požadavků zákazníků. Vzdálenosti mezi jednotlivými vrcholy  $i, j = 0, \dots, n$  jsou definovány maticí vzdáleností  $D$ . Úkolem je rozhodnout o posloupnosti (pořadí) navštívených vrcholů tak, aby se minimalizovala celková ujetá vzdálenost.

Pro potřeby matematického modelu zavedeme bivalentní proměnné  $x_{ij}$ . Když bude platit, že  $x_{ij} = 1$ , bude po obsluze vrcholu  $i = 0, \dots, n$  navštíven vrchol  $j = 0, \dots, n$ .

Matice vzdáleností, pro řešení úlohy matematickým modelem, se od běžné matice vzdáleností může lišit. Fakt, zda se matice vzdáleností pro potřeby matematického modelu liší od běžné matice vzdáleností, závisí na hodnotách, které může nabývat proměnná  $x_{ii}$ , kde  $i = 0, \dots, n$ . Pokud se v modelu bude připouštět, aby proměnná  $x_{ii}$  nabývala obou hodnot, potom musí být místo nulových hodnot dosazeny prohibivní konstanty. Nulové hodnoty mohou v matici zůstat pouze v případech, kdy se umožní, aby proměnná  $x_{ii}$  nabývala pouze hodnot  $x_{ii} = 0$  pro  $i = 0, \dots, n$ .

Dále bude v rámci výpočtu zavedena pomocná proměnná  $y_i$ , kde  $i = 1, \dots, n$ , která bude nabývat nezáporných celočíselných hodnot. Uvedená pomocná proměnná najde uplatnění v anticyklické podmínce.

Matematický model bude mít tvar:

$$\min f(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad \text{pro } j = 0, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = \sum_{i=0}^n x_{ji} \quad \text{pro } j = 0, \dots, n \quad (3)$$

$$y_i - y_j + n x_{ij} \leq n - 1 \quad \text{pro } i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad \text{pro } i, j = 0, \dots, n \quad (5)$$

$$y_i \in Z_0^+ \quad \text{pro } i = 1, \dots, n \quad (6)$$

Účelová funkce (1) reprezentuje celkovou ujetou vzdálenost v síti. Skupina omezujících podmínek (2) zajistí, že obsluze každého vrcholu bude předcházet obsluha právě jednoho jiného vrcholu. Skupina omezujících podmínek (3) zajistí kontinuitu jízdy vozidla. Skupina omezujících podmínek (4) zajišťuje, že nedojde ke vzniku nepřipustných typů podcyklů. Skupiny omezujících podmínek (5) – (6) vymezují definiční obory proměnných.

Matematický model ve tvaru (1) – (6) neumožňuje plánovat obsluhu zákazníků v situacích, kdy zákazníci požadují provedení obsluhy v definovaných časových intervalech (např. provozní doba zákazníka), což je v řešeném případě nezbytně nutné zajistit. Proto bude dále uvedena varianta modelu, která uvedený typ omezení umožňuje realizovat.

#### *2.1.4. Matematický model nahrazující Littlův algoritmus s časovými okny a větším počtem obslužných vozidel*

Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole i tento matematický model dokáže vyhledat minimální Hamiltonovu kružnici, s tím rozdílem, že tento matematický model již bere v úvahu časový interval obsluhy [2] nebo [4].

Zadání úlohy je stejné jako v podkapitole 2.1.3 s tím rozdílem, že v případě každého vrcholu (depo, zákazník), který má být navštíven, je definován časový interval  $\langle td_j; th_j \rangle$ , ve kterém má daný vrchol být obsloužen. Hodnota  $td_j$  reprezentuje nejdříve možný začátek obsluhy a hodnota  $th_j$  nejpozději přípustný čas obsluhy. K dispozici je počet vozidel  $R$ , která se nacházejí ve vrcholu 0. Každé vozidlo  $r = 1, \dots, R$  má definovanou kapacitu  $K_r$  a může být použito maximálně jednou. Dále je známa kladná doba přesunu  $c_{ij}$  mezi vrcholem  $i$  a vrcholem  $j$ , kdy  $i, j = 0, \dots, n$ .

Na rozdíl od modelu uvedeného v podkapitole 2.1.3 budou v modelu modifikované proměnné s následujícími významy:

$x_{ijr}$  – proměnná, pomocí níž je rozhodnuto o jízdě vozidla  $r = 1, \dots, R$  z vrcholu  $i = 0, \dots, n$  do vrcholu  $j = 0, \dots, n$



$t_{jr}$  – proměnná modelující čas, ve kterém započne obsluha vrcholu  $j = 0, \dots, n$  vozidlem  $r = 1, \dots, R$   
 $y_{ir}$  – pomocná proměnná pro  $i = 1, \dots, n$  a  $r = 1, \dots, R$

Kromě všech nově zavedených symbolů bude v modelu obsažen ještě jeden a to  $t_{max}$  plnící význam prohibivní konstanty.

Matematický model bude mít tvar:

$$\min f(x, y, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{r=1}^R d_{ij} x_{ijr} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{r=1}^R x_{ijr} = 1 \quad \text{pro } j = 0, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jr} \leq 1 \quad \text{pro } r = 1, \dots, R \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijr} = \sum_{i=0}^n x_{jir} \quad \text{pro } j = 0, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n b_j \sum_{i=0}^n x_{ijr} \leq K_r \quad \text{pro } r = 1, \dots, R \quad (11)$$

$$y_{ir} - y_{jr} + n x_{ijr} \leq n - 1 \quad \text{pro } i, j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (12)$$

$$t_{ir} + c_{ij} \leq t_{jr} + t_{max}(1 - x_{ijr}) \quad \text{pro } i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (13)$$

$$td_j \leq t_{jr} \quad \text{pro } j = 0, \dots, n, r = 1, \dots, R \quad (14)$$

$$t_{jr} \leq th_j \quad \text{pro } j = 0, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (15)$$

$$x_{ijr} \in \{0, 1\} \quad \text{pro } i, j = 0, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (16)$$

$$y_{ir} \in Z_0^+ \quad \text{pro } i = 1, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (17)$$

$$t_{jr} \geq 0 \quad \text{pro } j = 0, \dots, n; r = 1, \dots, R \quad (18)$$

Účelová funkce (7) reprezentuje opět celkově ujetou vzdálenost. Skupina omezujících podmínek (8) zajistí, že obsluze každého vrcholu bude předcházet obsluha právě jednoho jiného vrcholu stejným vozidlem. Skupina omezujících podmínek (9) zajistí, že každé vozidlo bude použito maximálně jednou. Skupina omezujících podmínek (10) zabezpečuje, kontinuitu jízdy a použitého vozidla. Skupina omezujících podmínek (11) zabezpečuje, že součet požadavků, které jsou obsluhovány vozidlem  $r = 1, \dots, R$ , nepřekročí jeho

kapacitu. Skupina omezujících podmínek (12) reprezentuje anticyklíci podmínku (viz také předchozí model). Skupina omezujících podmínek (13) zajišťuje, že pokud pojedou vozidlo z místa  $i$  do místa  $j$ , bude mezi časem začátku obsluhy místa  $i - t_{ir}$  a časem začátku obsluhy místa  $j - t_{jr}$  dostatečně dlouhá doba potřebná pro dokončení obsluhy místa  $i$  a přejezdu do místa  $j$ . Skupina omezujících podmínek (14) zajistí, že doba obsluhy nenastane dříve, než je možno. Skupina omezujících podmínek (15) zajistí, že doba obsluhy nenastane později, než je možno. Skupina obligatorních podmínek (16) – (18) vymezuje definiční obory proměnných.

V rámci optimalizačního problému řešeného diplomovou prací bude tento matematický model pozměněn. Konkrétně zmenšen o skupinu podmínek zabývajících se zajištěním dodržení kapacity vozidel a skupinu podmínek zajišťujících, že vozidla budou použita maximálně jednou. Tento krok je proveden z důvodu dostatečné kapacity vozidel, jak je zmíněno v kapitole 3.

## 2.2. *Heuristické metody*

Charakteristickým rysem heuristických metod je, že se mohou rozdělit na prosté heuristiky a metaheuristiky. Rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že zatímco u prostých heuristik výpočet končí po nalezení prvního lokálního optima, metaheuristiky mají v sobě zakomponován mechanismus, který jim umožní po nalezení lokálního optima toto lokální optimum opustit a to i za cenu dočasné nepřípustnosti řešení. K prostým heuristikám patří např. metoda nejbližšího dosud nenavštíveného vrcholu nebo Clarke – Wrightova metoda, příkladem metaheuristik jsou genetické algoritmy.

### 2.2.1. *Metoda nejbližšího dosud nenavštíveného vrcholu*

Metoda nejbližšího dosud nenavštíveného vrcholu patří k prostým heuristikám a používá se k vyhledání minimální Hamiltonovy kružnice. Postup metody spočívá v zahájení výpočtu v libovolném vrcholu sítě a postupném výběru incidujících hran a vrcholů tak, aby všechny vrcholy byly navštíveny. Postup je zakončen ve výchozím vrcholu. Uvedená metoda může být použita v kombinaci s Littlovým algoritmem, např. pro jednoduché vytvoření řešení reprezentujícího horní odhad hodnoty účelové funkce. Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [9].

### 2.2.2. Clark Wrightova Metoda

Clarke – Wrightova metoda [3] je heuristickou metodou a byla sestavena za účelem řešení problematiky okružních jízd stejně jako Littlův algoritmus. Rozdíl mezi těmito metodami je však takový, že CWM na rozdíl od Littlova algoritmu umožňuje při řešení zohledňovat celou řadu dodatečných omezení, což Littlův algoritmus nedokáže.

Cílem základní varianty metody je sestavit soustavu okružních jízd tak, aby každý požadavek zákazníka byl splněn, při svozu a rozvozu zásilek, nebyly překročeny kapacity vozidel a zároveň, aby byla při obsluze dopravní sítě nalezena pokud možno co nejkratší soustava okružních jízd.

Metoda spočívá v postupné náhradě soustavy kyvadlových jízd (která je brána jako výchozí nejhorší řešení) okružními jízdami. Sdružování kyvadlových jízd do okružních jízd probíhá na základě tzv. výhodnostních koeficientů, které charakterizují úspory vznikající v situacích, kdy dané spojení vrcholů bude realizováno či nikoliv. Výhodnostní koeficienty se vypočítají na základě známých vzdáleností mezi vrcholy v síti nebo jiných hodnot, pomocí kterých se určuje kvalita řešení (celková doba jízdy, náklady na zabezpečení obsluhy zákazníků apod.). „Metoda sdruží v každé iteraci postupu ty dva uzly, které vykazují nejvyšší výhodnostní koeficient, pokud je možné s ohledem na přípustnost toto sdružení provést.“ [3], [9]

### 2.2.3. Genetické Algoritmy

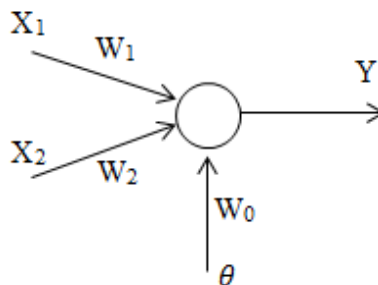
Princip genetických algoritmů je založen na evoluční biologii. Genetické algoritmy spadají do kategorie metaheuristických metod a na rozdíl od ostatních exaktních i heuristických metod pracují s více řešeními najednou, které se mezi sebou kombinují. Množina aktuálně zpracovávaných řešení se nazývá populace. Každý jedinec v populaci reprezentuje jednotlivé řešení a je popsán genetickým kódem nesoucím informaci o daném jedinci – chromozomem. Kvantitativní vyjádření kvality jedince je provedeno na základě fitness hodnoty. Jedinec s vyšší hodnotou fitness má větší pravděpodobnost, že přejde do nové generace (platí pochopitelně u maximalizačních úloh, u minimalizačních úloh je tomu naopak). V rámci řešení postupně jednotlivé populace zanikají a místo nich vznikají populace nové, pokud možno kvalitativně lepší. Nové generace populací jsou vytvářeny na základě genetických operátorů, jimiž jsou selekce, mutace a křížení

(a některé další doplňkové operátory). Problémy lze s využitím genetických algoritmů řešit např. speciálního toolbox v software MATLAB.

Z hlediska dopravních aplikací se genetické algoritmy s úspěchem uplatnily při řešení trasovacích úloh (úloh o tvorbě okružních jízd) a dále v některých specializovaných problémech, např. při vkládání dodatečných tras do sestaveného grafikonu vlakové dopravy. Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [10] nebo [15].

#### 2.2.4. Umělé neuronové sítě

Umělé neuronové sítě jsou také heuristickou metodou výpočtu, která je využívána, v situacích, kdy exaktní metody při řešení úlohy, ať již časově nebo výpočetně selhávají nebo pro řešení úlohy neexistují. Princip metod založených na umělých neuronových sítích vychází z matematického popisu činnosti nervových soustav. Základním stavebním prvkem umělé neuronové sítě je neuron, viz obr. č. 2.2. Neurony jsou mezi sebou v síti propojeny synaptickými vlákny s definovanými synaptickými váhami a jsou charakteristické libovolným počtem vstupů i výstupů. Na obr. č. 2.2 symboly  $W$  reprezentují synaptické váhy vláken, symboly  $X$  reprezentuje signály na vstupu, symbol  $Y$  reprezentuje signál na výstupu a  $\theta$  reprezentuje konstantní prahovou hodnotu.



Obr. č. 2.2: Příklad neuronu

Základním problémem, který je nutno při použití umělých neuronových sítí vyřešit, je tzv. proces učení. Proces učení umělé neuronové sítě probíhá pomocí změn vah přiřazených synaptickým vláknům. Při nastavování (změnách) vah synaptických vláken se dbá na skutečnost, aby umělá neuronová síť jako celek dávala očekávanou odezvu. Tento typ učení je nazýván učení s učitelem a základním předpokladem pro jeho úspěšný průběh je existence dostatečného počtu správných a různorodých tréninkových vzorů (analogie s výukou matematiky – čím větší počet různorodých příkladů student vypočítá, tím získává větší praxi při použití matematiky k řešení praktických úloh). Kromě učení

s učitelem se využívá i tzv. učení bez učitele, toto je však vhodné pouze pro určité typy úloh.

Z učících algoritmů se při procesu učení s učitelem nejčastěji vyskytují Hebbovo (někdy také Delta) učící pravidlo vhodné pro typ sítě zvané Perceptron nebo algoritmus backpropagation. Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [11].

#### *2.2.5. Optimalizace pomocí algoritmů pracujících na bázi mravenčích kolonií*

Algoritmy pracující na bázi mravenčích kolonií [5] jsou metaheuristickou metodou, která je inspirována hmyzím životem, někdy se také říká rojovou inteligencí. Hmyz totiž při hledání potravy vykazuje unikátní schopnost postupně najít nejkratší cestu, která je k dispozici. Nezávislí jedinci totiž mezi sebou nepřímo komunikují tím, že označují absolvovanou cestu tak, aby byla preferována právě ta nejvýhodnější z více možných. V případě mravenčích kolonií jednotliví jedinci při hledání cesty za potravou vypouštějí tzv. feromony, přičemž nejperspektivnější cesta se vyznačuje nejvyšším množstvím produkovaných feromonů. Cesty vyznačující se zvýšenou hladinou vyprodukovaných feromonů jsou mravenci preferovány, cesty vyznačující se sníženou hladinou vyprodukovaných feromonů jsou postupně opouštěny a vyřazovány ze zájmu mravenců. V algoritmech založených na bázi mravenčích kolonií se objem vyprodukovaných feromonů matematicky formalizuje s tím, že podle výše uvedeného principu je simulováno chování mravenců.

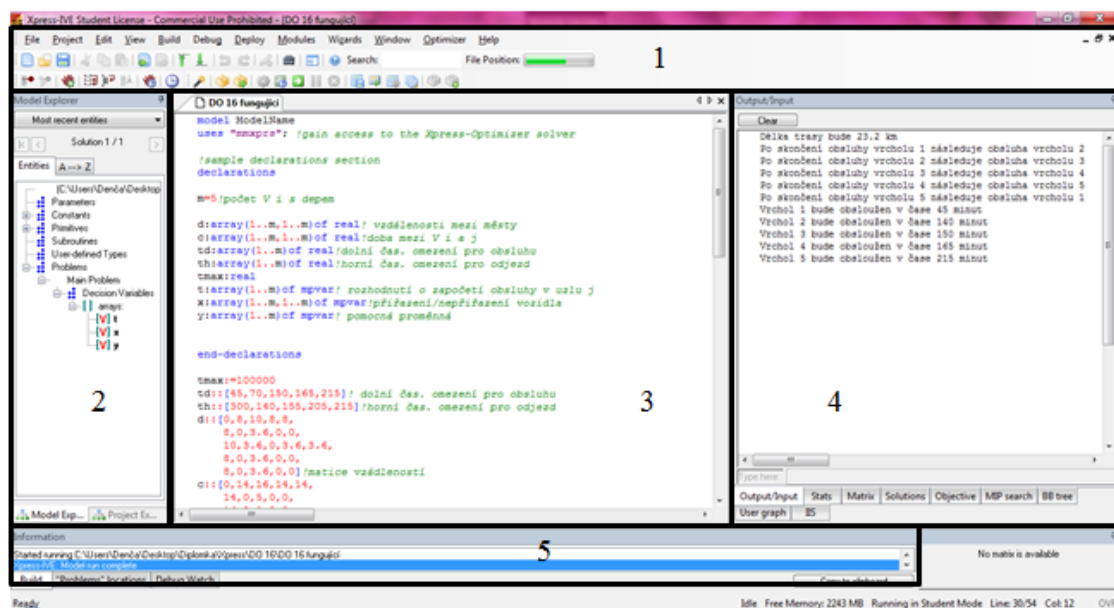
I ze stručně provedeného teoretického popisu je zřejmé, že aplikační potenciál metod lze najít i v případě dopravních systémů, zpravidla při řešení problémů souvisejících s vyhledáním optimálních cest v dopravní síti (zejména v kombinatoricky náročných úlohách). Algoritmus je podrobně popsán v publikaci [5].

#### *2.3. Zdůvodnění výběru vhodné metody pro řešení*

S ohledem na provedenou charakteristiku potenciálních výpočetních metod a relativně malý rozsah řešeného problému může být využita exaktní metoda – řešení pomocí matematického modelu s časovými okny (Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW).

## 2.4. Optimalizační software Xpress – IVE

V rámci této diplomové práce bude k optimalizačnímu výpočtu využit optimalizační software Xpress - IVE. Software byl vyvinut americkou společností FICO. Xpress - IVE slouží k řešení lineárních modelů. Software používá programovací jazyk MOSEL. Aby bylo možno provést výpočet, je zapotřebí transformovat matematický model do tohoto programovacího jazyku. Programovací jazyk MOSEL není náročný. Na obr. č. 2.3 je znázorněna základní pracovní plocha software Xpress - IVE.



Obr. č. 2.3: Pracovní plocha software Xpress - IVE

Toto pracovní okno by se dalo rozdělit do 5 částí, jak lze vidět na obrázku. V části č. 1 se nachází panel ovládání. Dalo by se říci, že klíčovými ikonami z hlediska řešení jsou ikony *Compile* a *Run model*. Ikona *Compile* zobrazuje, zda je zápis v okně č. 3 správně napsán, či obsahuje syntaktickou chybu zápisu. V případě, že zápis obsahuje syntaktickou chybu, je řešitel na tuto chybu upozorněn pomocí zabarvení příslušného řádku s chybou žlutou barvou a zároveň je tato chyba popsána v okně č. 5. Ikona *Run model* v okně č. 1 zahájí optimalizační výpočet, po jehož ukončení se vypíší výsledné hodnoty v okně č. 4, požádá-li o to řešitel speciálním příkazem v textu programu. V okně č. 2 jsou vypisovány všechny entity obsažené v modelu. Okno č. 3 slouží k zápisu textu programu v programovacím jazyce MOSEL, který nahrazuje sestavený matematický model řešeného problému.

V další části bude popsána transformace matematického modelu do programovacího jazyku MOSEL.

### 2.4.1. Transformace matematického modelu do jazyku MOSEL

Konkrétní příklad transformace matematického modelu do textu programu v jazyce MOSEL se vztahuje už ke konkrétní provozní situaci popsané v kapitole 3.2.

Software rozlišuje malá a velká písmena. Způsob zápisu do jazyku MOSEL má vždy stejnou strukturu.

První část textu zápisu se skládá z následujícího tvaru:

```
model ModelName  
uses "mmxprs"
```

Následuje popis deklarační části, kdy jsou zapisovány výrazy ve tvaru: konstanta typu pole – *array(rozsah)of real*; proměnná typu pole – *array(rozsah)of mpvar*, konstanta, která není typu pole – *real* a proměnná, která není typu pole – *mpvar*. Zápis deklarační části je v případě situace popsané v podkapitole 3.2 následující:

```
declarations  
m = 4  
d: array(0..n, 0..n)of real  
c: array(0..n, 0..n)of real  
td: array(0..n)of real  
th: array(0..n)of real  
tmax: real  
t: array(0..n)of mpvar  
x: array(0..n, 0..n)of mpvar  
y: array(1..n)of mpvar  
end – declarations
```

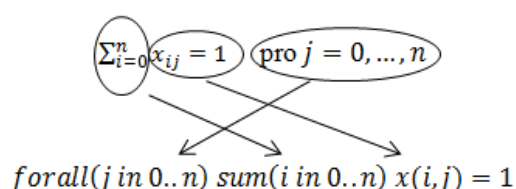
Symbol *n* udává počet obsluhovaných zákazníků v dané provozní situaci.

Za deklarační části jsou uvedeny hodnoty jednotlivých konstant, které se v matematickém modelu nacházejí.

```
tmax := 100000  
td:: [45,70,150,165,215]  
th:: [300,140,155,205,215]  
d:: [0,8,10,8,8,  
      8,0,3.6,0,0,
```

10,3.6,0,3.6,3.6,  
8,0,3.6,0,0,  
8,0,3.6,0,0]  
 $c:: [0,14,16,14,14,$   
14,0,5,0,0,  
16,5,0,5,5,  
14,0,5,0,0,  
14,0,5,0,0]

V další části textu programu se uvádějí omezující podmínky. Postup transformace typické omezující podmínky z matematického modelu do textu programu je patrný z následujícího schématu:



Omezující podmínky v textu programu tedy budou mít tvar:

$forall(j \text{ in } 0..n) sum(i \text{ in } 0..n) x(i, j) = 1$   
 $forall(j \text{ in } 0..n) sum(i \text{ in } 0..n) x(i, j) = sum(i \text{ in } 0..n) x(j, i)$   
 $forall(i \text{ in } 1..n, j \text{ in } 1..n) y(i) - y(j) + n * x(i, j) \leq n - 1$   
 $forall(i \text{ in } 0..n, j \text{ in } 1..n) t(i) + c(i, j) \leq t(j) + tmax * (1 - x(i, j))$   
 $forall(j \text{ in } 0..n) d(j) \leq td(j)$   
 $forall(j \text{ in } 0..n) t(j) \leq hd(j)$   
 $forall(i \text{ in } 0..n) x(i, i) = 0$

Je důležité uvést, že software Xpress – IVE automaticky dosazuje za definiční obor proměnných obor nezáporných čísel. V řešené situaci mají proměnné  $x_{ij}$  v definičním oboru hodnoty 0 a 1. Zápis podmínky deklarující, že proměnné  $x_{ij}$  jsou bivalentní má tvar:

$forall(i \text{ in } 0..n, j \text{ in } 0..n) x(i, j) \text{ is\_binary}$

Je-li zapotřebí zapsat definiční obor pro proměnnou, která bude nabývat celých nezáporných čísel, bude místo klíčového slova *binary* použito klíčové slovo *integer*.

Po sepsání podmínek následuje formulace účelové funkce např.:

$HUF := sum(i \text{ in } 0..n, j \text{ in } 0..n) d(i, j) * x(i, j)$



Dále je nutno v textu programu uvést, jaký typ extrému bude hledán. Zda bude hodnota účelové funkce minimalizována – příkaz *minimize* a nebo maximalizována – příkaz *maximize*. V řešené úloze se minimalizuje celková ujetá vzdálenost, tzn., příkaz bude tvar:

$$\text{minimize}(HUF)$$

V neposlední řadě se do textu programu může vložit požadavek na výpis výsledných hodnot, pro který se využívá příkaz *writeln*. Požaduje-li řešitel výpis hodnoty účelové funkce, učiní tak příkazem *getobjval*, např. způsobem:

$$\text{writeln}(HUF: , \text{getobjval}, \text{Km})$$

Požaduje-li řešitel výpis hodnot proměnných, příp. jiných výsledných hodnot, učiní tak příkazem *getsol*, např. způsobem:

$$\text{forall}(i \text{ in } 0..n, j \text{ in } 0..n | \text{getsol}(x(i, j)) \\ > 0) \text{writeln}(\text{"Po skončení obsluhy místa ", } i, \text{" následuje obsluha místa ", } j)$$

### 3. Výpočetní experimenty v reálných podmínkách

Postup výpočetních experimentů spojených s vybranou metodou (VRPTW) je možno charakterizovat následovně: bude zvolen konkrétní den z minulosti, ve kterém byla prováděna obsluha zákazníků a poboček České pošty na zvoleném území a na základě reálných dat bude proveden optimalizační výpočet. Výsledky získané optimalizačním výpočtem budou následně porovnány s výsledky reálného provozu a vyhodnoceny. Vyhodnocení procesu testování bude provedeno na základě celkové délky trasy obslužného vozidla. Z hlediska technologie současné obsluhy je charakteristické, že časy obsluhy jednotlivých míst jsou kumulovány do krátkých časových intervalů, přičemž daná místa jsou určitým způsobem prostorově rozptýlena. V dalším postupu bude tedy zjišťováno, zda rozvolněním časů obsluhy jednotlivých míst není dosahováno úspory v počtu kilometrů ujetých při obsluze těchto míst. Výsledkem této etapy výpočetních experimentů budou doporučení týkající se změn časů obsluhy tak, aby celkový počet kilometrů najetých při obsluze, byl co nejnižší. Je na zvážení České pošty, zda úpravy časů obsluh na základě výsledků optimalizačního výpočtu provede či nikoliv.

Pokud bude zjištěno, že existuje možnost úspory v ujeté vzdálenosti a bude záměr časy obsluh zákazníků z tohoto hlediska upravit, je nutno kontaktovat zákazníky, zda s případnou úpravou času obsluhy souhlasí a co se týče obsluhy poboček České pošty, prověřit, do jaké míry se změna času obsluhy projeví v hospodaření firmy. Prověřování uvedené v předchozí větě však není obsahem diplomové práce, jedná se pouze o konstatování, aby bylo zřejmé, že dopady způsobené změnami časů obsluh se mohou projevit i v jiných oblastech hospodaření České pošty.

Jako konkrétní den pro testování optimality bylo vybráno úterý 18. 2. 2014.

Přehled přiřazení jednotlivých obcí doručovacím okrskům 1 - 4 je uveden v tab. 3.1. Je nutno zmínit, že pro obsluhu každého z uvedených doručovacích okrsků je vyčleněno samostatné vozidlo.

Tab. 3.1

<i>Doručovací okrsek 1</i>	<i>Doručovací okrsek 2</i>	<i>Doručovací okrsek 3</i>	<i>Doručovací okrsek 4</i>
Oldřišov	Štěpánkovice	Kobeřice	Chuchelná
Hněvošice	Kravaře	Bolatice	Strahovice
Chlebičov			Rohov
Velké Hoštice			Bolatice
Kravaře			

V souvislosti s řešením svozně/rozvozních úloh na dopravní síti jsou důležité také otázky týkající se dodržování kapacit obslužných vozidel. Na základě sdělení odpovědného pracovníka depa je kapacita vozidel provádějících obsluhu zákazníků v doručovacích okrscích 1 – 4 z 99% dostatečná vzhledem k objemu požadavků zákazníků, z tohoto důvodu nebudou ve výpočetních experimentech kapacity vozidel zohledňovány. V případě převýšení kapacity vozidla, se situace řeší následovně - vozidlo, dle plánu rozveze objem požadavků, které je schopno pojmout. Objem požadavků, které nebylo možno rozvést, je rozvezen poté, co je k dispozici volné vozidlo.

Počty balíkových zásilek, které v řešený den byly doručovány v jednotlivých okrscích, jsou pro přehled uvedeny v tab. 3.2:

Tab. 3.2

Číslo doručovacího okrsku	Počet přepravovaných zásilek
1	21
2	75
3	57
4	28

Pro každý doručovací okrsek je v současnosti znám jízdní řád, který by měl být při obsluze dodržován a dále musí být k dispozici informace o vzdálenostech mezi jednotlivými místy, která mají být obsloužena. Za účelem zjednodušení průběhu optimalizačního výpočtu budou vytvořeny shluky zákazníků nacházejících se ve stejné obci. Vytváření shluků zákazníků sice může způsobit určité nepřesnosti (z hlediska ujeté vzdálenosti), nicméně umožní maximálně zrychlit běh optimalizačního výpočtu, což je důležité zejména při operativním řízení provozu.

V každém jízdním řádu bude uveden seznam míst, které je nutno obsloužit (místo odpovídá vytvořenému shluku), u každého místa bude uveden úkon (y), který je nutno realizovat a čas obsluhy.

### 3.1. Výpočetní experiment – doručovací okrsek 1

Doručovací okrsek 1 má za úkol obsloužit obce Kravaře, Chlebičov, Oldřišov, Hněvošice a Velké Hoštice, poté se vozidlo vrací zpět do depa, následně obslouží Kravaře a poté zakončí jízdu v depu. Jízdní řád doručovacího okrsku 1 je uveden v tab. 3.3, která je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Z důvodu plánované obsluhy zákazníků v okrsku ve dvou fázích, je nutno řešit dvě situace reprezentované dvěma modely – modelem pro doručovací okrsek 1/1 (Kravaře, Chlebičov, Oldřišov, Hněvošice, Velké Hoštice) a modelem pro doručovací okrsek 1/2 (Kravaře).

V tab. 3.4 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okrsek 1/1, tato matice udává vzdálenosti mezi obsluhovanými obcemi (včetně Depa Opava).

Tab. 3.4

DO 1/1 - vzdálenosti						
Vzdálenosti [km]	Depo	Kravaře	Chlebičov	Oldřišov	Hněvošice	Velké Hoštice
Depo	0	8	10	12	16	8.2
Kravaře	8	0	6.4	10	11	3.1
Chlebičov	10	6.4	0	5.3	6.6	3.5
Oldřišov	12	10	5.3	0	4.6	7.3
Hněvošice	16	11	6.6	4.6	0	11
Velké Hoštice	8.2	3.1	3.5	7.3	11	0

V tab. 3.5 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi jednotlivými obcemi (včetně Depa Opava).

Tab. 3.5

DO 1/1 – doby přejezdů						
Časy [min]	Depo	Kravaře	Chlebičov	Oldřišov	Hněvošice	Velké Hoštice
Depo	0	14	15	17	17	10
Kravaře	14	0	10	15	17	4
Chlebičov	15	10	0	5	7	7
Oldřišov	17	15	9	0	8	12
Hněvošice	17	17	7	8	0	10
Velké Hoštice	10	4	7	12	12	0

Matice vzdáleností a matice časů byly sestaveny na základě informací z internetového serveru [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz) [14].

V tab. 3.6 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okrsek 1. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tzn., je-li výchozím bodem 13:00 (časový okamžik 0) a zákazníci v obci Kravaře mají být obslouženi od 14:20 do 14:55, bude mít pro potřebu matematického modelu časové okno hranice od 80 do 115. Tab. 3.6 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Dále následuje ukázka konkrétního matematického modelu pro DO 1/1.

$$\min f(x, y, t) = 0 * x_{11} + \dots + 11 * x_{56} + 0 * x_{66}$$

za podmínek

$$x_{00} + x_{10} + \dots + x_{50} = 1$$

...

$$x_{05} + x_{15} + \dots + x_{55} = 1$$

$$x_{00} + x_{10} + \dots + x_{50} = x_{00} + x_{01} + \dots + x_{05}$$

...

$$x_{05} + x_{15} + \dots + x_{55} = x_{50} + x_{51} + \dots + x_{55}$$

$$y_1 - y_1 + 5 * x_{11} \leq 4$$

...

$$y_5 - y_5 + 5 * x_{55} \leq 4$$

$$t_0 + 0 \leq t_1 + 100000 * (1 - x_{01})$$

...

$$t_5 + 0 \leq t_5 + 100000 * (1 - x_{55})$$

$$60 \leq t_0$$

...

$$150 \leq t_5$$

$$t_0 \leq 180$$

...

$$t_5 \leq 150$$

$$x_{00} = 0$$

...

$$x_{55} = 0$$

$$x_{00}; x_{01}; \dots; x_{55} \in \{0,1\}$$

$$y_1; \dots; y_5 \in Z_0^+$$

$$t_0; t_1; \dots; t_5 \geq 0$$

Následuje text programu v programovacím jazyce MOSEL.

Model v programu Xpress-IVE:

*model DO 1/1*

*uses "mmxprs";*

*declarations*

*m=5*

*d:array(0..n,0..n)of real*

*c:array(0..n,0..n)of real*

*td:array(0..n)of real*

*th:array(0..n)of real*

*tmax:real*

*t:array(0..n)of mpvar*

*x:array(0..n,0..n)of mpvar*

*y:array(1..n)of mpvar*

*end-declarations*

*tmax:=100000*

*td::[ 60,80,125,130,140,150]*

*th:: [180,115,125,130,140,150]*

*d::[0,8,10,12,16,8.2,*

*8,0,6.4,10,11,3.1,*

*10,6.4,0,5.3,6.6,3.5,*

*12,10,5.3,0,4.6,7.3,*

*16,11,6.6,4.6,0,11,*

*8.2,3.1,3.5,7.3,11,0]*

*c::[0,14,15,17,17,10,*

*14,0,10,15,17,4,*

*15,10,0,5,7,7,*

*17,15,9,0,8,12,*

*17,17,7,8,0,10,*

*10,4,7,12,12,0]*

*forall(i in 0..n,j in 0..n)x(i,j)is\_binary*

*forall(j in 0..n)sum(i in 0..n)x(i,j)=1*

*forall(j in 0..n)sum(i in 0..n)x(i,j)=sum(i in 0..n)x(j,i)*

*forall(i in 1..n,j in 1..n)y(i)-y(j)+n\*x(i,j)<=n-1*

*forall(i in 0..n,j in 1..n)t(i)+c(i,j)<=t(j)+tmax\*(1-x(i,j))*

*forall(j in 0..n) td(j)<=t(j)*

*forall(j in 0..n) t(j)<=th(j)*

```
forall(i in 0..n)x(i,i)=0
```

```
UF:=sum(i in 0..n,j in 0..n)d(i,j)*x(i,j)
```

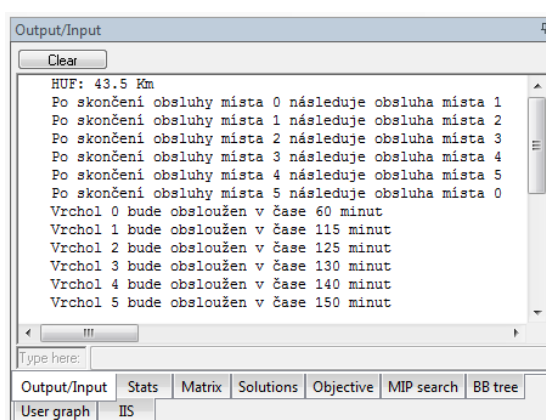
```
minimize(UF)
```

```
writeln("UF: ",getobjval," Km")
```

```
forall(i in 0..n,j in 0..n\getsol(x(i,j))>0)writeln("Po skončení obsluhy místa ",i," následuje  
obsluha místa ",j)
```

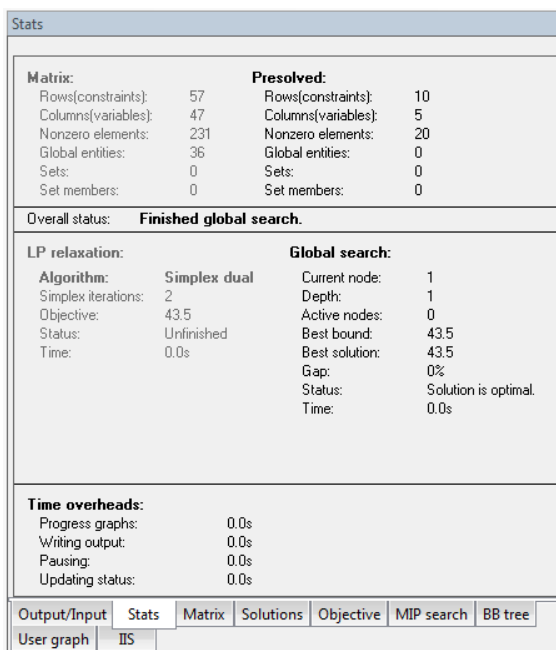
```
forall(i in 0..n)writeln("Vrchol ",i," bude obsloužen v čase ",getsol(t(i))," minut")end-  
model
```

Na obr. č. 3.1 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress- IVE.

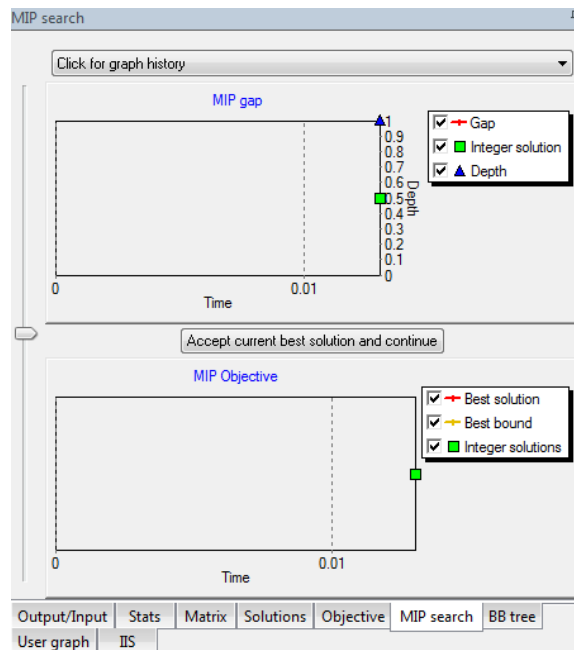


Obr. č. 3.1: Výsledek optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 1/1 je 43,5 km, přičemž vozidlo pojede z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 0. Místo 0 bude obslouženo v čase 60 min počítáno od 13 hodin. To znamená, že odjezd z Depa Opava nastane v čase 14:00. Analogicky se provedou přepočty ostatních hodnot. Na obr. č. 3.2 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu (záložka Stats), na obr. č. 3.3 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu (záložka MIP search).



Obr. č. 3.2: Záložka Stats



Obr. č. 3.3: Záložka MIP search

## Doručovací okrsek 1/2

V tab. 3.7 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okrsek 1/2, tato matice udává vzdálenosti mezi depem Opava a obcí Kravaře.

Tab. 3.7

DO 1/2 - vzdálenosti				
Vzdálenosti [km]	Depo	Kravaře	Kravaře	Kravaře
Depo	0	8	8	8
Kravaře	8	0	0	0
Kravaře	8	0	0	0
Kravaře	8	0	0	0

V tab. 3.8 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi depem Opava a obcí Kravaře.

Tab. 3.8

DO 1/2 – doby přejezdů				
Časy [min]	Depo	Kravaře	Kravaře	Kravaře
Depo	0	14	14	14
Kravaře	14	0	0	0
Kravaře	14	0	0	0
Kravaře	14	0	0	0



V tab. 3.9 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okrese 1. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.9 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Model v programu Xpress IVE:

```

model DO 1/2
uses "mmxprs";
declarations
n=3
d:array(0..n,0..n)of real
c:array(0..n,0..n)of real
td:array(0..n)of real
th:array(0..n)of real
tmax:real
t:array(0..n)of mpvar
x:array(0..n,0..n)of mpvar
y:array(1..n)of mpvar
end-declarations

tmax:=100000
td:=[ 170,215,235,295]
th:=[ 320,215,290,295]
d:=[ 0,8,8,8,
    8,0,0,0,
    8,0,0,0,
    8,0,0,0]
c:=[ 0,14,14,14,
    14,0,0,0,
    14,0,0,0,
    14,0,0,0]
forall(i in 0..n,j in 0..n)x(i,j)is_binary
forall(j in 0..n)sum(i in 0..n)x(i,j)=1
forall(j in 0..n)sum(i in 0..n)x(i,j)=sum(i in 0..n)x(j,i)

```

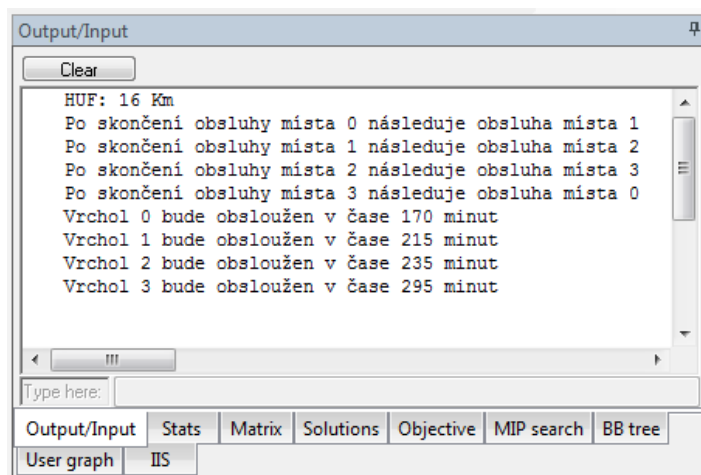
```

forall(i in 1..n,j in 1..n)y(i)-y(j)+n*x(i,j)<=n-1
forall(i in 0..n,j in 1..n)t(i)+c(i,j)<=t(j)+tmax*(1-x(i,j))
forall(j in 0..n) td(j)<=t(j)
forall(j in 0..n) t(j)<=th(j)
forall(i in 0..n)x(i,i)=0

UF:=sum(i in 0..n,j in 0..n)d(i,j)*x(i,j)
minimize(UF)
writeln("UF:",getobjval," Km")
forall(i in 0..n,j in 0..n|getsol(x(i,j))>0)writeln("Po skončení obsluhy místa ",i," následuje obsluha místa ",j)
forall(i in 0..n)writeln("Vrchol ",i," bude obsloužen v čase ",getsol(t(i))," minut")
end-model

```

Na obr. č. 3.4 opět vidíme výsledné hodnoty doručovacího okrsku 1/2.



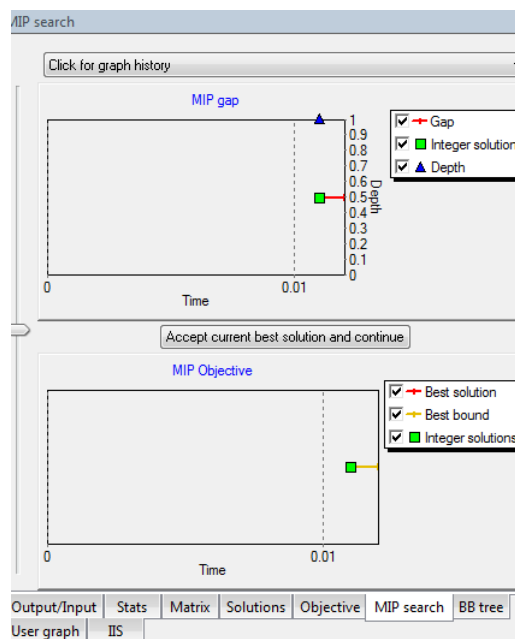
Obr. č. 3.4: Výsledek optimalizace

Je zřejmé, že celkově ujetá vzdálenost v této části doručovacího okrsku je rovna 16 km, přičemž vozidlo pojede z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 3 – 0.

Na obr. č. 3.5 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu, na obr. č. 3.6 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.

Stats			
<b>Matrix:</b>		<b>Presolved:</b>	
Rows(constraints):	23	Rows(constraints):	3
Columns(variables):	23	Columns(variables):	3
Nonzero elements:	85	Nonzero elements:	6
Global entities:	16	Global entities:	0
Sets:	0	Sets:	0
Set members:	0	Set members:	0
<b>Overall status: Finished global search.</b>			
<b>LP relaxation:</b>		<b>Global search:</b>	
Algorithm:	Simplex primal	Current node:	1
Simplex iterations:	0	Depth:	1
Objective:	16	Active nodes:	0
Status:	Unfinished	Best bound:	16
Time:	0.0s	Best solution:	16
		Gap:	0%
		Status:	Solution is optimal.
		Time:	0.0s
<b>Time overheads:</b>			
Progress graphs:	0.0s		
Writing output:	0.0s		
Pausing:	0.0s		
Updating status:	0.0s		
Output/Input   Stats   Matrix   Solutions   Objective   MIP search   BB tree User graph   IIS			

Obr. č. 3.5: Záložka Stats



Obr. č. 3.6: Záložka MIP search

Celková hodnota ujeté vzdálenosti v doručovacím okrsku 1 bude sestávat ze součtu hodnot ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 1/1 a ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 1/2. Výsledná vzdálenost, která bude ujeta bude tedy rovna 59,5 km.

Analogicky budou provedeny výpočty pro všechny ostatní doručovací okrsky. Dále budou prezentovány již pouze vstupní hodnoty a výsledné tabulky z programu Xpress–IVE pro zbývající doručovací okrsky.

### 3.2. Výpočetní experiment – doručovací okrsek 2

Doručovací okrsek 2 má za úkol obsloužit obce Kravaře a Štěpánkovice, poté se vozidlo vrací zpět do Kravař a poté zakončí jízdu v depu. Jízdní řád doručovacího okrsku 2 je uveden v tab. 3.10, která je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

V tab. 3.11 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okrsek 2, tato matice udává vzdálenosti mezi obsluhovanými obcemi (včetně Depa Opava).

Tab. 3.11

DO 2 - vzdálenosti					
Vzdálenosti [km]	Depo	Kravaře	Štěpánkovice	Kravaře	Kravaře
Depo	0	8	10	8	8
Kravaře	8	0	3.6	0	0
Štěpánkovice	10	3.6	0	3.6	3.6
Kravaře	8	0	3.6	0	0
Kravaře	8	0	3.6	0	0

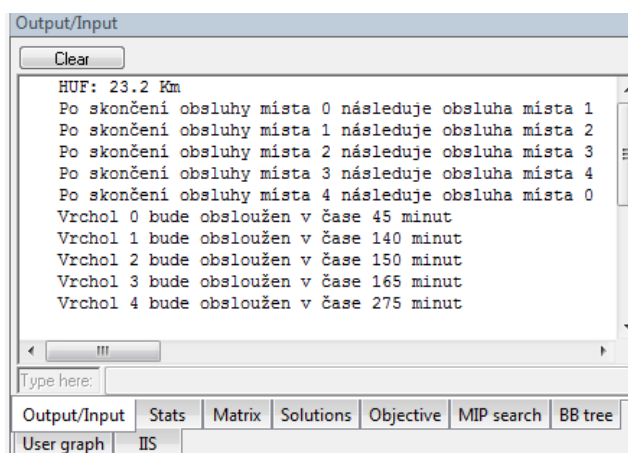
V tab. 3.12 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi jednotlivými obcemi (včetně Depa Opava).

Tab. 3.12

DO 2 – doby přejezdů					
Doba [min]	Depo	Kravaře	Štěpánkovice	Kravaře	Kravaře
Depo	0	14	16	14	14
Kravaře	14	0	5	0	0
Štěpánkovice	16	5	0	5	5
Kravaře	14	0	5	0	0
Kravaře	14	0	5	0	0

V tab. 3.13 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okresek 2. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.13 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

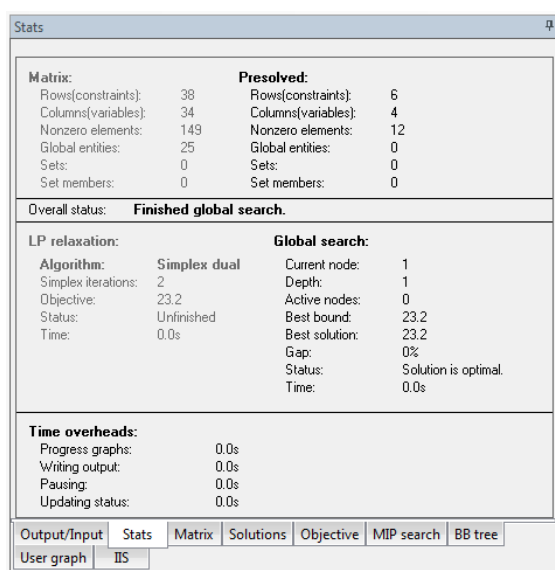
Na obr. č. 3.7 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress-IVE.



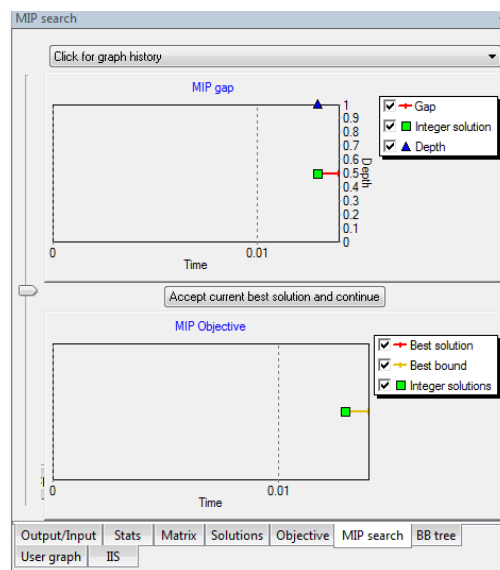
Obr. č. 3.7: Výsledek optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 2 je 23,2 km, přičemž vozidlo pojedě z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 3 – 4 – 0. Na obr. č. 3.8 je zobrazeno stavové

hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu. Na obr. č. 3.9 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.



Obr. č. 3.8: Záložka Stats



Obr. č. 3.9: Záložka MIP search

### 3.3. Výpočetní experiment – doručovací okrsek 3

Doručovací okrsek 3 má za úkol obsloužit obci Kobeřice, poté se vozidlo vrací zpět do depa a následně obslouží obci Bolatice, poté zakončí jízdu v depu. Jízdní řád doručovacího okrsku 3 je uveden v tab. 3.14, která je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Z důvodu plánované obsluhy zákazníků v okrsku ve dvou fázích, je nutno řešit dvě situace reprezentované dvěma modely- modelem pro doručovací okrsek 3/1 (Kobeřice) a modelem pro doručovací okrsek 3/2 (Bolatice). Způsob výpočtu bude pro obě části stejný.

V tab. 3.15 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okrsek 3/1, tato matice udává vzdálenosti mezi Depem Opava a obsluhovanou obcí Kobeřice.

Tab. 3.15

DO 3/1 - vzdálenosti			
Vzdálenosti [km]	Depo	Kobeřice	Kobeřice
Depo	0	14	14
Kobeřice	14	0	0
Kobeřice	14	0	0

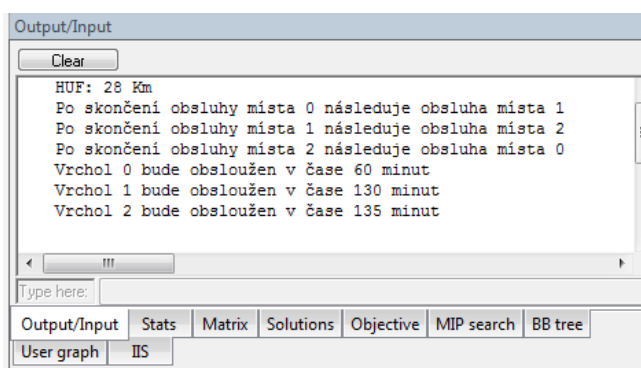
V tab. 3.16 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi Depem Opava a obcí Kobeřice.

Tab. 3.16

DO 3/1 - doby přejezdů			
Doba [min]	Depo	Kobeřice	Kobeřice
Depo	0	22	22
Kobeřice	22	0	0
Kobeřice	22	0	0

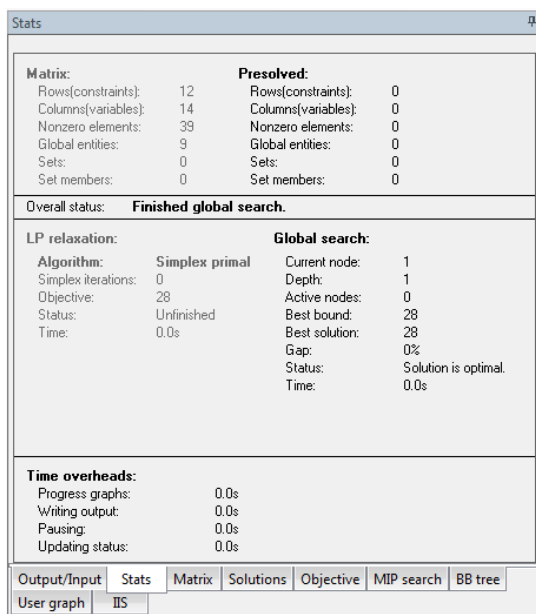
V tab. 3.17 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okresek 3. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.17 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Na obr. č. 3.10 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress-IVE.

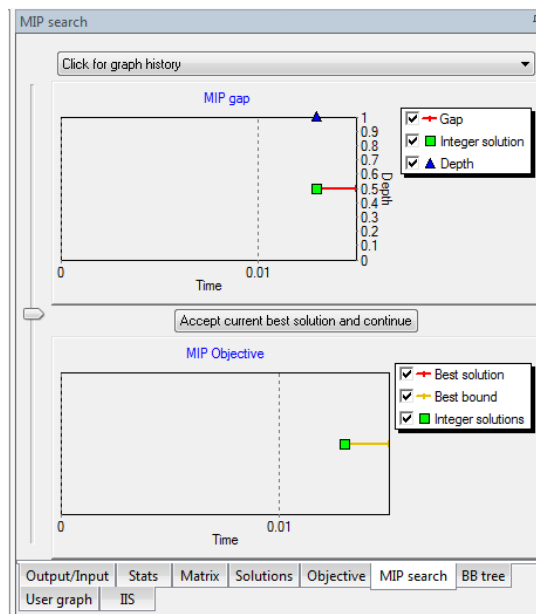


Obr. č. 3.10: Výsledky optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 3/1 je 28 km, přičemž vozidlo pojedí z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 0. Na obr. č. 3.11 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu. Na obr. č. 3.12 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.



Obr. č. 3.11: Záložka Stats



Obr. č. 3.12: Záložka MIP search

### Doručovací okresek 3/2

V tab. 3.18 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okresek 3/2, tato matice udává vzdálenosti mezi Depem Opava a obcí Bolatice.

Tab. 3.18

DO 3/2 - vzdálenosti			
Vzdálenosti [km]	Depo	Bolatice	Bolatice
Depo	0	13	13
Bolatice	13	0	0
Bolatice	13	0	0

V tab. 3.19 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi Depem Opava a obcí Bolatice.

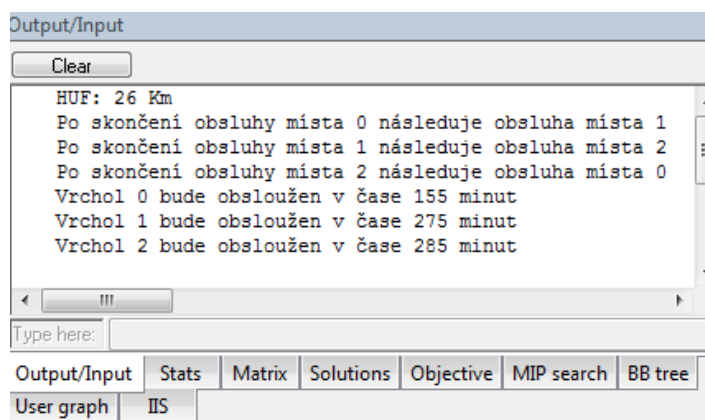
Tab. 3.19

DO 3/2 – doby přejezdů			
Doba [min]	Depo	Bolatice	Bolatice
Depo	0	22	22
Bolatice	22	0	0
Bolatice	22	0	0

V tab. 3.20 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okresek 3. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.20

je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

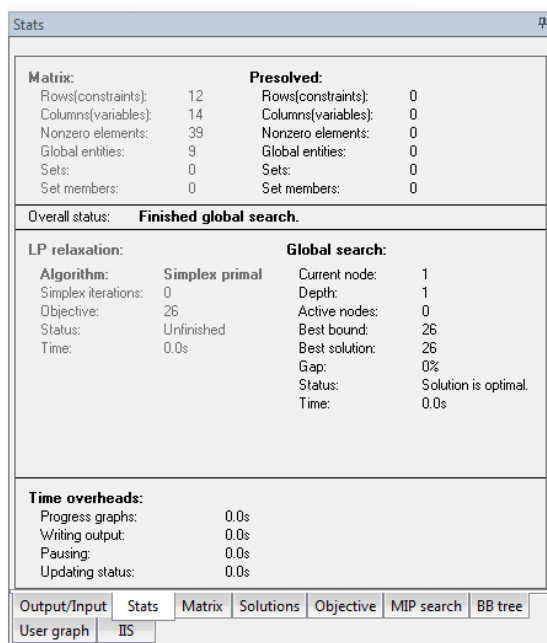
Na obr. č. 3.13 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress-IVE.



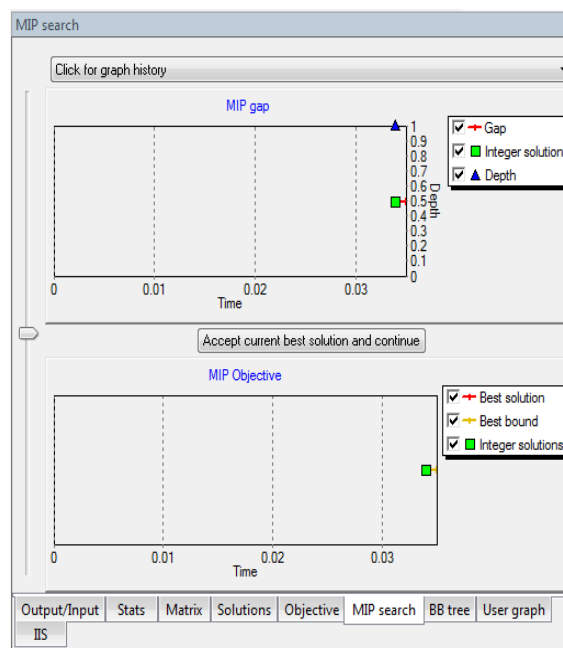
Obr. č. 3.13: Výsledky optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 3/2 je 26 km, přičemž vozidlo pojede z vrcholu do vrcholu následovně: 0-1-2-0.

Na obr. č. 3.14 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu. Na obr. č. 3.15 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.



Obr. č. 3.14: Záložka Stats



Obr. č. 3.15: Záložka MIP search

Celková hodnota ujeté vzdálenosti v doručovacím okrsku 3 se bude sestávat ze součtu hodnot ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 3/1 a ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 3/2. Výsledná vzdálenost, která bude ujeta bude tedy rovna 54 km.



### 3.4. Výpočetní experiment – doručovací okresek 4

Doručovací okresek 4 má za úkol obsloužit obce Chuchelná, Strahovice, Rohov a Bolatice, poté se vozidlo vrací zpět do depa a následně obslouží obci Bolatice, poté zakončí jízdu v depu. Jízdní řád doručovacího okrsku 4 je uveden v tab. 3.21, která je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Z důvodu plánované obsluhy zákazníků v okrsku ve dvou fázích, je nutno řešit dvě situace reprezentované dvěma modely- modelem pro doručovací okresek 4/1 (Chuchelná, Strahovice, Rohov a Bolatice) a modelem pro doručovací okresek 4/2 (Bolatice). Způsob výpočtu bude pro obě části stejný.

V tab. 3.22 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okresek 4/1, tato matice udává vzdálenosti mezi obsluhovanými obcemi (včetně Depa Opava).

Tab. 3.22

DO 4/1 - vzdálenosti						
Vzdálenosti [km]	Depo	Chuchelná	Chuchelná	Strahovice	Rohov	Bolatice
Depo	0	19	19	17	18	13
Chuchelná	19	0	0	3.3	5.3	6.5
Chuchelná	19	0	0	3.3	5.3	6.5
Strahovice	17	3.3	3.3	0	2.2	8
Rohov	18	5.3	5.3	2.2	0	8.6
Bolatice	13	6.5	6.5	8	8.6	0

V tab. 3.23 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi jednotlivými obcemi (včetně Depa Opava).

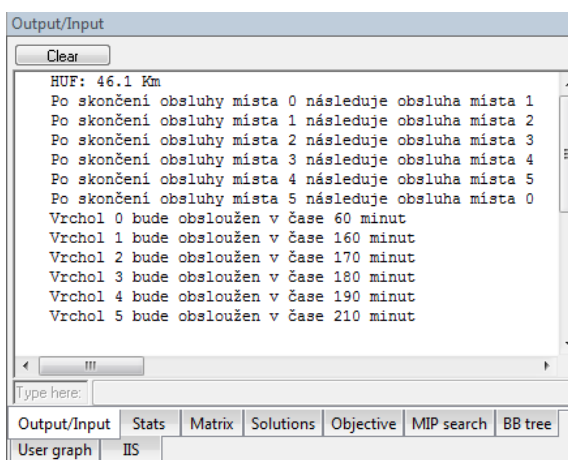
Tab. 3.23

DO 4/1 – doby přejezdů						
Doba [min]	Depo	Chuchelná	Chuchelná	Strahovice	Rohov	Bolatice
Depo	0	33	33	28	25	22
Chuchelná	33	0	0	5	8	11
Chuchelná	33	0	0	5	8	11
Strahovice	28	5	5	0	4	12
Rohov	25	8	8	4	0	12
Bolatice	22	11	11	12	12	0

V tab. 3.24 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okresek 4. Hranice

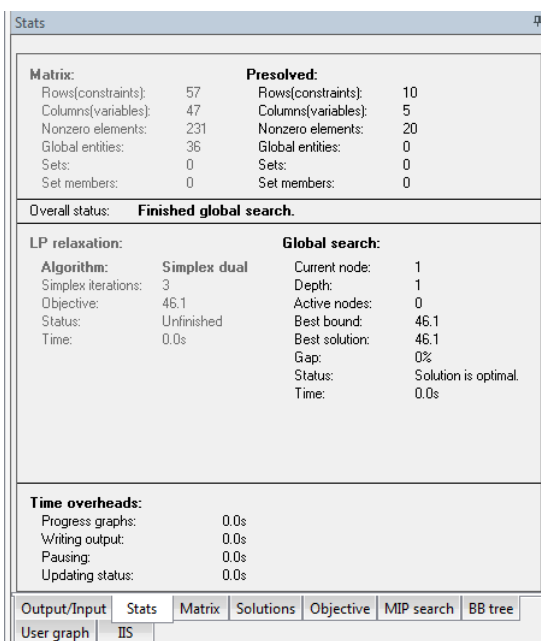
časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.24 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

Na obr. č. 3.16 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress-IVE.

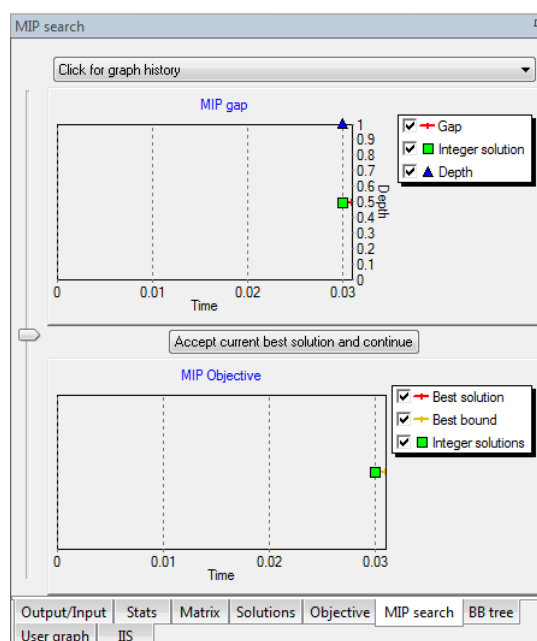


Obr. č. 3.16: Výsledek optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 4/1 je 46,1 km, přičemž vozidlo pojedě z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 0. Na obr. č. 3.17 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu, na obr. č. 3.18 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.



Obr. č. 3.17: Záložka Stats



Obr. č. 3.18: Záložka MIP search

#### Doručovací okrsek 4/2

V tab. 3.25 je uvedena matice vzdáleností pro doručovací okrsek 4/2, tato matice udává vzdálenosti mezi depem Opava a obcí Bolatice.

Tab. 3.25

DO 4/2 - vzdálenosti			
Vzdálenosti [km]	Depo	Bolatice	Bolatice
Depo	0	13	13
Bolatice	13	0	0
Bolatice	13	0	0

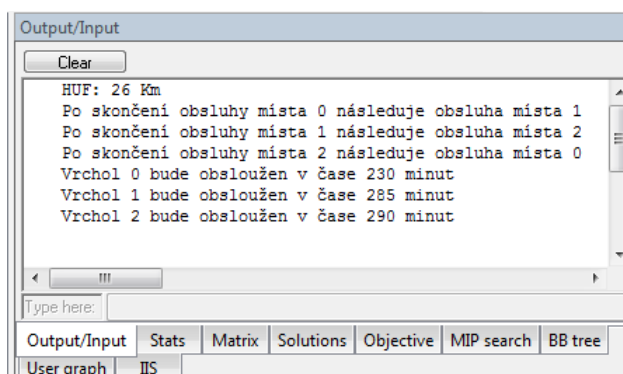
V tab. 3.26 je uvedena matice časů, které reprezentují doby přejezdů mezi depem Opava a obcí Bolatice.

Tab. 3.26

DO 4/2 – doby přejezdů			
Doba [min]	Depo	Bolatice	Bolatice
Depo	0	22	22
Bolatice	22	0	0
Bolatice	22	0	0

V tab. 3.27 jsou zobrazena časová okna, která je nutno při obsluze dodržet. Tyto hodnoty jsou identifikovány z jízdního řádu pro doručovací okrsek 4. Hranice časových oken jsou stanoveny od výchozího časového bodu, tímto bodem bude 13h. Tab. 3.27 je však z důvodu ochrany obchodních informací České pošty, s. p. obsažena pouze v tištěné variantě práce.

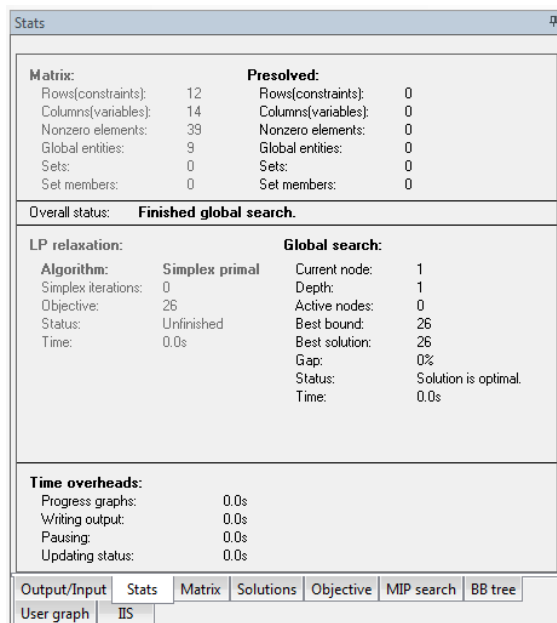
Na obr. č. 3.19 je možno vidět výsledné hodnoty vypočtené v programu Xpress- IVE.



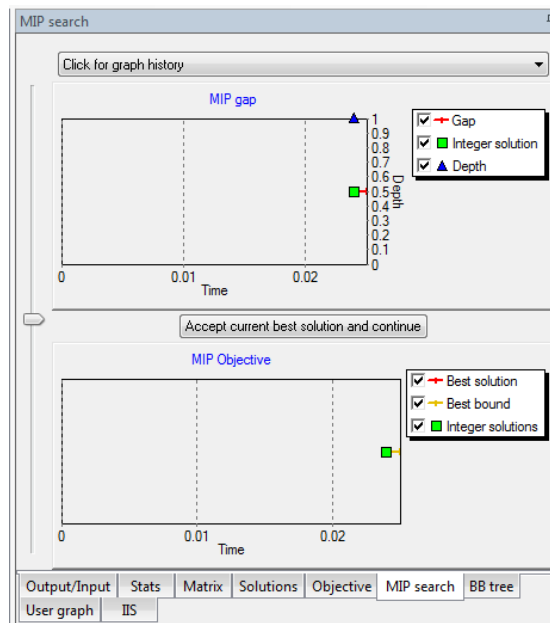
Obr. č. 3.19: Výsledky optimalizace

Délka ujeté trasy v doručovacím okrsku 4/2 je 26 km, přičemž vozidlo pojedě z vrcholu do vrcholu následovně: 0 – 1 – 2 – 0.

Na obr. č. 3.20 je zobrazeno stavové hlášení deklarující nalezení optimálního řešení a jeho hodnotu. Na obr. č. 3.21 je znázorněn průběh optimalizačního výpočtu.



Obr. č. 3.20: Záložka Stats



Obr. č. 3.21: Záložka MIP search

Celková hodnota ujeté vzdálenosti v doručovacím okrsku 4 bude sestávat ze součtu hodnot ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 4/1 a ujeté vzdálenosti při obsluze části doručovacího okrsku 4/2. Výsledná vzdálenost, která bude ujeta bude tedy rovna 72,1 km.

### 3.5. Výsledné hodnoty optimalizace

Výsledky výpočtů pro všechny doručovací okrsky a jejich porovnání se současným stavem jsou uvedeny v tab. 3.28.

Tab. 3.28

Doručovací okrsek	1		2	3		4	
Část doručovacího okrsku	DO 1/1	DO 1/2	DO 2	DO 3/1	DO 3/2	DO 4/1	DO 4/2
HÚF [km]	43,5	16	23,2	28	26	46,1	26
Celková ujetá vzdálenost	59,5		23,2	54		72,1	
Vzdálenosti ujeté ČP	59,5		23,2	54		72,1	

Na základě výsledků optimalizačních výpočtů lze říci, že jízdní řád užívaný Českou poštou je optimálně sestaven, jelikož v rámci optimalizačních výsledků nedošlo k úspoře ujetých km.

### 3.6. Optimalizace časových mezí obsluhy

V rámci zjištění možných úspor při obsluze zákazníků byla zjišťována citlivost optimální vzdálenosti na změnách časových oken pro provedení obsluhy. Dá se předpokládat, že zvětšením časových oken pro obsluhu jednotlivých zákazníků může dojít k přeplánování tras s menší celkovou ujetou vzdáleností. Postupně bude zvětšována meze časových oken po 5 minutách, tzn., že od dolní meze časového okna bude odečteno 5 minut a k horní mezi časového okna bude přičteno 5 minut. Meze časových oken budou postupně upraveny o následující hodnoty:  $\pm 5$  min,  $\pm 10$  min,  $\pm 15$  min,  $\pm 20$  min,  $\pm 25$  min,  $\pm 30$  min,  $\pm 35$  min, až na hodnotu  $\pm 40$  min.

Po každé úpravě časové meze bude proveden výpočet analogicky jako v předchozích podkapitolách.

Výsledné hodnoty optimalizačních výpočtů jsou shrnuty v tab. 3.29.

Tab. 3.29

Doručovací okrsky	1		2	3		4	
Část doručovacího okrsku	DO 1/1	DO 1/2	DO 2	DO 3/1	DO 3/2	DO 4/1	DO 4/2
HÚF [km]	43,5	16	23,2	28	26	46,1	26
Celkově ujetá vzdálenost	59,5		23,2	54		72,1	
± 5	43,5	16	23,2	28	26	46,1	26
	59,5			54		72,1	
± 10	41,1	16	21,6	28	26	46,1	26
	57,1			54		72,1	
± 15	40,9	16	21,6	28	26	46,1	26
	56,9			54		72,1	
± 20	40,5	16	21,6	28	26	43	26
	56,5			54		69	
± 25	37,8	16	21,6	28	26	43	26
	53,8			54		69	
± 30	37,8	16	21,6	28	26	43	26
	53,8			54		69	
± 35	37,8	16	21,6	28	26	43	26
	53,8			54		69	
± 40	37,8	16	21,6	28	26	43	26
	53,8			54		69	
Maximální dosažená úspora ujetých km	5,7		1,6	-		3,1	

Z tabulky je zřejmé, že v doručovacím okrsku 1 dojde k maximální úspoře ujeté vzdálenosti při úpravě časové mezery od  $\pm 25$  minut – úspora činí 5,7 km na jednu jízdu,

v doručovacím okrsku 2 dojde k maximální úspoře ujeté vzdálenosti při úpravě časové mezery od  $\pm 10$  minut – úspora činí 1,6 km na jednu jízdu a v doručovacím okrsku 4 dojde k úspoře ujeté vzdálenosti při úpravě časové mezery od  $\pm 20$  minut – úspora činí 3,1 km na jednu jízdu. V doručovacím okrsku 3 nedojde k žádné úspoře ujeté vzdálenosti, a to ani v případě, že budou časová okna změněna o  $\pm 40$  min.

V rámci změn časových oken dojde i ke změnám pořadí obsluhy jednotlivých míst. Při umožnění změn časových oken obsluhy jednotlivých míst je účelné zabývat se identifikací skutečných časových posunů obsluhy jednotlivých míst v doručovacích okrcích. V tab. 3.30 jsou uvedeny skutečné posuny časů obsluhy jednotlivých míst u doručovacího okrsku 1, v tab. 3.31 jsou uvedeny skutečné posuny časů obsluhy jednotlivých míst u doručovacího okrsku 2 a v tab. 3.32 jsou uvedeny skutečné posuny časů obsluhy jednotlivých míst u doručovacího okrsku 4.

Tab. 3.30

Doručovací okrsek	1									
Obsloužené vrcholy	0	1	5	2	4	3	0	1	3	2
Skutečná hodnota posunu	-25	-	-25	+7	-1	+17	-25	-5	-25	+25

Tab. 3.31

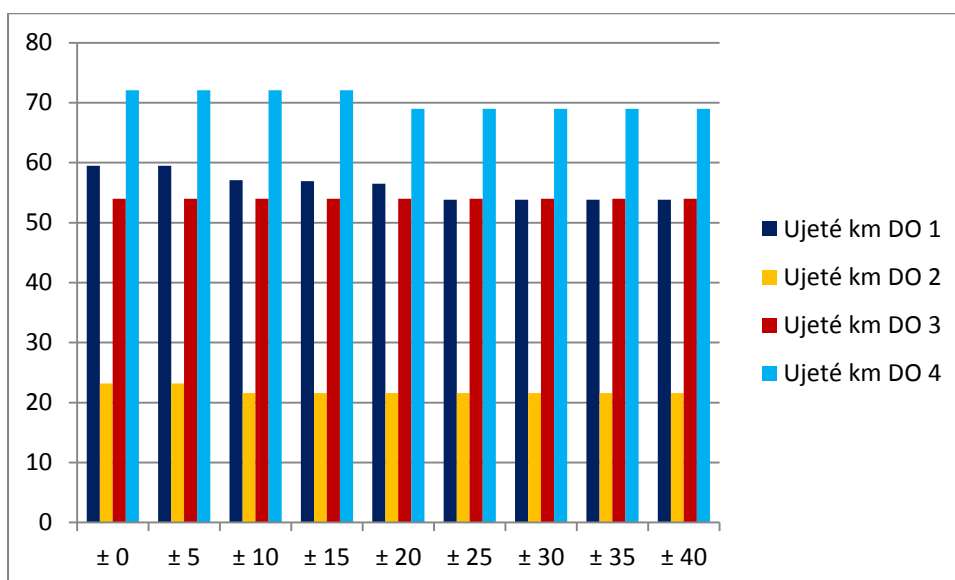
Doručovací okrsek	2				
Obsloužené vrcholy	0	2	1	3	4
Skutečná hodnota posunu	-10	-10	+10	-10	-10

Tab. 3.32

Doručovací okrsek	4									
Obsloužené vrcholy	0	4	3	2	1	5	0	2	1	
Skutečná hodnota posunu	-20	-20	-6	+9	+20	-19	-20	-20	-	

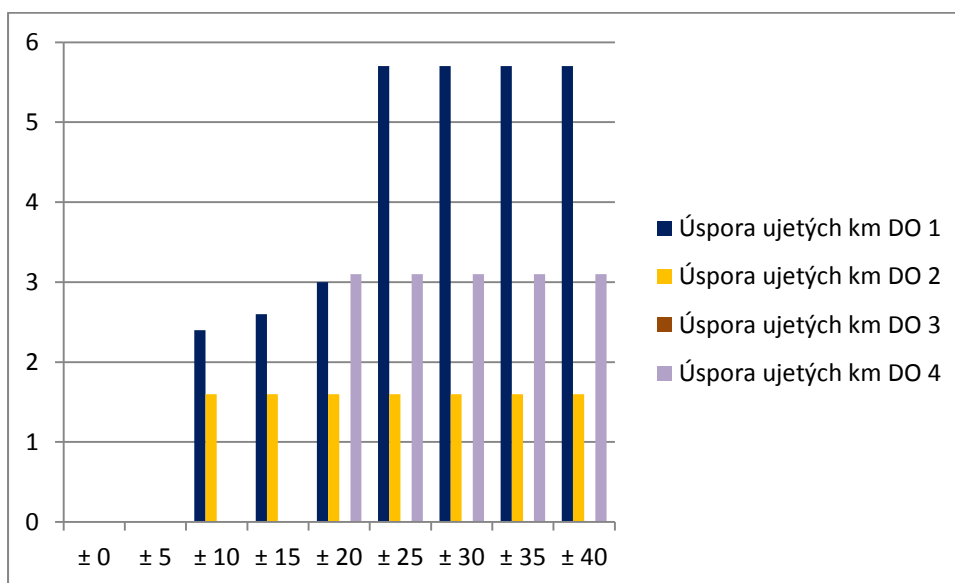
V doručovacím okrsku 1 budou místa obsloužena ve směru 0 – 1 – 5 – 2 – 4 – 3 – 0 – 1 – 3 – 2 – 0. V doručovacím okrsku 2 budou místa obsloužena následovně 0 – 2 – 1 – 3 – 4 – 0 a v doručovacím okrsku 4 budou místa obsloužena v pořadí 0 – 4 – 3 – 2 – 1 – 5 – 0 – 2 – 1 – 0.

V grafu č. 3.1 je možno vidět průběh vývoje počtu ujetých km v závislosti na změnách velikosti časových oken.



Graf č. 3.1: Vývoj ujetých km v závislosti na změnách časových oken

V grafu č. 3.2 jsou znázorněny úspory ujetých km v rámci změn časových oken jednotlivých doručovacích okrsků.



Graf č. 3. 2: Vývoj úspory ujetých km v závislosti na změnách časových oken

### 3.7. Optimalizace slučování doručovacích okrsků

Další možnost snižování počtu ujetých kilometrů může vyplynout ze slučování existujících doručovacích okrsků nebo jejich částí. Pokus hledání dalších úspor bude proveden pro případ sloučení doručovacích okrsků 3 a 4. Doručovací okrsky 3 a 4 byly ke sloučení vybrány proto, že obsluhovaná místa se nachází v blízké vzdálenosti od sebe a tedy dá se očekávat, že by mohlo dojít k určité úspoře.

Tento nový okrsek bude pro přehlednost nazván doručovací okrsek X. Přidělení zákazníků do jednotlivých částí nově vzniklého testovaného doručovacího okrsku je uvedeno v tab. 3.33.

Nově vzniklý doručovací okrsek zůstane nadále obsluhován ve dvou fázích a to z důvodu požadovaného návratu obslužného vozidla do depa v průběhu řešeného období. Meze časových oken jednotlivých zákazníků budou nastaveny na stávající hodnoty, dle současných jízdních řádů.

Tab. 3.33

DO	Obslužné místo	Stávající DO	Časové okna		Ujetá vzdálenost [km]
			Dolní mez	Horní mez	
DO X/1	Depo	4	60	240	48,3
	Kobeřice	3	95	130	
	Kobeřice	3	135	135	
	Chuchelná	4	110	160	
	Chuchelná	4	170	170	
	Strahovice	4	180	180	
	Rohov	4	190	190	
	Bolatice	4	210	210	
DO X/2	Depo	4	230	320	26
	Bolatice	3	175	275	
	Bolatice	3	285	285	
	Bolatice	4	260	285	
	Bolatice	4	290	290	
Celková ujetá vzdálenost v doručovacím okrsku X					74,3
Celková ujetá vzdálenost v doručovacích okrscích 3 a 4					126,1
Úspora ujetých km					51,8

Budou-li sloučeny doručovací okrsky 3 (54 ujetých km) a 4 (72,1 ujetých km), dojde k úspoře 51,8 km. U této metody však není jisté, zda při sloučení těchto dvou doručovacích okrsků bude kapacita vozidla dostačující.



## 4. Zhodnocení výsledků optimalizace

V této kapitole budou zhodnoceny výsledky optimalizačních výpočtů provedených v předchozí kapitole.

V podkapitole 3.5 byla prověřována optimalita v současnosti existujících tras v jednotlivých doručovacích okrscích. Na základě optimalizačních výpočtů bylo zjištěno, že trasy, které v současnosti využívá Česká pošta, a pořadí obsluh jsou optimálně nastaveny. Důvodem pro toto tvrzení bylo, že v rámci optimalizačních výpočtů nedošlo ke snížení hodnot délek současných jízd, tzn., k žádné úspoře ujetých km.

V podkapitole 3.6 bylo testováno, zda nelze dosáhnout úspory v důsledku zvětšení časových oken pro obsluhu zákazníků. V rámci této optimalizace došlo k úspoře ujetých km, viz tab. 3.29.

V rámci podkapitoly 3.7 bylo testováno, zda nelze dosáhnout úspory v celkové ujeté vzdálenosti vlivem sloučení doručovacích okrsků, konkrétně doručovacích okrsků 3 a 4. Výsledky optimalizačního výpočtu navrhly způsob obsluhy, při kterém vlivem sloučení okrsků dojde k úspoře 51,8 km.

V rámci optimalizace nebylo počítáno s úsporou ujetých km v oblasti obsluhovaných obcí, jak již bylo řečeno, došlo totiž ke shluku zákazníků v daných městech. Na základě výsledků výpočetních experimentů je možno konstatovat, že výsledky neobsahují situaci, kdy by některý zákazník nebyl obslužen, tzn., že počet vozidel je dostačující.

V rámci slučování doručovacích okrsků je také nutno uvést, že při sloučení doručovacích okrsků může dojít k tomu, že kapacita vozidla již nebude dostačující, tudíž by muselo být využito opět dvou vozidel k obsluze.

Je nutno také uvést, že úspora ujetých km se vztahuje pouze k Depu Opava. Nemusí však platit, že se bude jednat o celkovou úsporu nákladů v rámci České pošty. Změní-li se totiž časové okno obsluhovaného místa např. pobočky České pošty, může to znamenat, že bude ovlivněna její provozní doba, to znamená, že se mohou zvýšit náklady této pobočky a výsledná úspora ujetých km může být s těmito náklady zanedbatelná nebo dokonce může dojít i ke zvýšení nákladů. Zhodnocení z pohledu České pošty by vyžadovalo daleko podrobnější analýzu vstupních dat a daleko podrobnější matematický model, který by počítal s větším spektrem variant možných přípustných řešení.

## **5. Formulace doporučení z hlediska implementace vhodných metod do praxe**

Česká pošta, s. p. je na trhu již dlouhou řadu let a po celou tuto dobu se snaží optimalizovat a vyvíjet nové způsoby, které by vedly k racionalizaci již stávajících řešení z hlediska obsluhy zákazníků. V předložené diplomové práci byly hledány úspory v ujeté vzdálenosti při obsluze zákazníků spadajících do doručovacích okrsků depa Opava. K optimalizaci byly použity metody lineárního programování. Při použití optimalizačních metod na bázi lineárního programování nebyly zjištěny významnější úspory v ujeté vzdálenosti. To však může být ovlivněno především vlivem neexistence podrobnějších údajů týkajících se obsluhy jednotlivých zákazníků, nebylo tedy možno přesněji definovat vstupní hodnoty pro optimalizační výpočet.

Obecně v úloze o obsluze zákazníků v doručovacích okrscích vyžadujících dodržení časových oken při jejich obsluze platí, že úspor lze dosáhnout buď v důsledku rozšíření časových oken, nebo v důsledku změn v doručovacích okrscích. Navržené postupy řešení by mohly přinést zásadnější úspory pouze v situacích, kdy by byly k dispozici nejen vstupní podklady v adekvátní míře podrobnosti a to nejen z hlediska obsluhy zákazníků ale také i z hlediska důsledků způsobených případnými změnami v časech obsluh jednotlivých zákazníků nebo také změnami v přidělování zákazníků doručovacím okrskům.

V každém případě je nutno závěrem objektivně konstatovat, že metody matematického programování mají určitý potenciál pro řešení daného problému a že by se zvýšením rozsahu vstupních dat umožnily optimalizovat náklady na provoz distribučního systému v depu Opava i ze širšího úhlu pohledu (České pošty jako celku).

## 6. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou doručování balíkových zásilek v rámci obvodu depa České pošty v Opavě. Cílem této diplomové práce je prověřit optimalitu procesu svozu a rozvozu balíkových zásilek pro konkrétní část obvodu vybraného depa.

V úvodní části je definován cíl diplomové práce. Následně jsou popsány možné způsoby řešení dané problematiky a je vybrána konkrétní metoda, která bude k řešení použita. K řešení byl vybrán matematický model, který byl následně řešen v optimalizačním software Xpress–IVE.

V hlavní části byly provedeny optimalizační výpočty založeny na reálných datech. Na základě dostupných dat bylo zjištěno, že trasy naplánované Českou poštou jsou optimální. Následně byly hledány možnosti dalšího snížení celkové ujeté vzdálenosti a to rozvolněním časových intervalů obsluhy míst nebo sloučením doručovacích okrsků.

V závěrečné části byly zhodnoceny dosažené výsledky optimalizace a formulována doporučení. V každém případě se však ukázalo, že omezený rozsah vstupních dat neumožnil plné využití potenciálu optimalizačních metod.

## 7. Použitá literatura

- [1] JANÁČEK, J., Optimalizace na dopravních sítích, Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2006, ISBN 80-8070-586-0
- [2] JANÁČEK, J., Matematické programování, Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2003, ISBN 80-8070-054-0
- [3] Clarke–Wrightova metoda řešení úlohy VRP [online]. Dostupné z:  
<[http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1p/lide/michal/Clarke\\_Wright.pdf](http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1p/lide/michal/Clarke_Wright.pdf)>
- [4] KOZEL, P., Úloha okružních jízd s časovými okny [online] 2011. Dostupné z:  
<[http://pernerscontacts.upce.cz/23\\_2011/Kozel.pdf](http://pernerscontacts.upce.cz/23_2011/Kozel.pdf)>
- [5] KRÖMER, P., Optimalizace pomocí mravenčích kolonií [online] 2012. Dostupné z:  
<<http://homel.vsb.cz/~kro080/mravenci.pdf>>
- [6] DORDA, M., Floydův algoritmus [online]. Dostupné z:  
<[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fhomel.vsb.cz%2F~dor028%2FFloyd\\_v\\_algoritmus.doc&ei=2r5sU9qXMo3DPKaRgfAN&usg=AFQjCNExMNXl2aPdeHDrph6D67tZivNrHq&sig2=9ZgCIW2-9RZ8RCuQwdL7Cw&bvm=bv.66330100,d.ZWU](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fhomel.vsb.cz%2F~dor028%2FFloyd_v_algoritmus.doc&ei=2r5sU9qXMo3DPKaRgfAN&usg=AFQjCNExMNXl2aPdeHDrph6D67tZivNrHq&sig2=9ZgCIW2-9RZ8RCuQwdL7Cw&bvm=bv.66330100,d.ZWU)>
- [7] PAVLÁSEK, O., Grafy a grafové algoritmy [online]. Dostupné z:  
<<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/1094/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20ve%C5%99ejn%C3%A1.pdf?sequence=1>>
- [8] DORDA, M., Littlův algoritmus [online]. Dostupné z:  
<[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fhomel.vsb.cz%2F~dor028%2FLittl\\_v\\_algoritmus.doc&ei=rMNsU-HOOIyw7Abpo4GYCg&usg=AFQjCNEHrCawsSsSPYq63ukoQbgHGFPirw&sig2=CrPGfnxF\\_STB0IKJNR5o-w](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fhomel.vsb.cz%2F~dor028%2FLittl_v_algoritmus.doc&ei=rMNsU-HOOIyw7Abpo4GYCg&usg=AFQjCNEHrCawsSsSPYq63ukoQbgHGFPirw&sig2=CrPGfnxF_STB0IKJNR5o-w)>
- [9] TEICHMANN, D., Optimalizace technologických procesů [online]. Dostupné z:  
<[http://issuu.com/michdor/docs/m14\\_text?e=7481937/1712195](http://issuu.com/michdor/docs/m14_text?e=7481937/1712195)>
- [10] POSPĚCH, L., Využití genetických algoritmů při řešení problémů silniční dopravy [online]. Dostupné z:  
<<http://dspace.vsb.cz/handle/10084/890/browse?value=Genetick%C3%A9+algoritmy&type=subject>>
- [11] BALHAR, D., Využití neuronových sítí při řešení problem letecké dopravy [online]. Dostupné z:  
<<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/93709?show=full>>

[12] <[http://www.postovnikuryr.cz/postovni\\_kuryr\\_kveten2013.pdf](http://www.postovnikuryr.cz/postovni_kuryr_kveten2013.pdf)>

[13] <[http://www.radekov.cz/galerie/Depo\\_Opava/Depo%20Opava.htm](http://www.radekov.cz/galerie/Depo_Opava/Depo%20Opava.htm)>

[14] <[www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)>

[15] Genetické algoritmy [online]. Dostupné z:

<[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fphysics.ujep.cz%2F~mmaly%2Fvyuka%2Fruzne%2Fneuronky-](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fphysics.ujep.cz%2F~mmaly%2Fvyuka%2Fruzne%2Fneuronky-genetika%2FGa.doc&ei=LtpoU9aCJamN7Aac84HwAg&usg=AFQjCNG0b2CDoUozcD_abC4PWA9QwWO6hQ&sig2=RhF635zA7LVAKT_KYzJA3g&bvm=bv.66111022,d.ZGU)

[genetika%2FGa.doc&ei=LtpoU9aCJamN7Aac84HwAg&usg=AFQjCNG0b2CDoUozcD\\_abC4PWA9QwWO6hQ&sig2=RhF635zA7LVAKT\\_KYzJA3g&bvm=bv.66111022,d.ZGU](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CEUQFjAC&url=http%3A%2F%2Fphysics.ujep.cz%2F~mmaly%2Fvyuka%2Fruzne%2Fneuronky-genetika%2FGa.doc&ei=LtpoU9aCJamN7Aac84HwAg&usg=AFQjCNG0b2CDoUozcD_abC4PWA9QwWO6hQ&sig2=RhF635zA7LVAKT_KYzJA3g&bvm=bv.66111022,d.ZGU)>